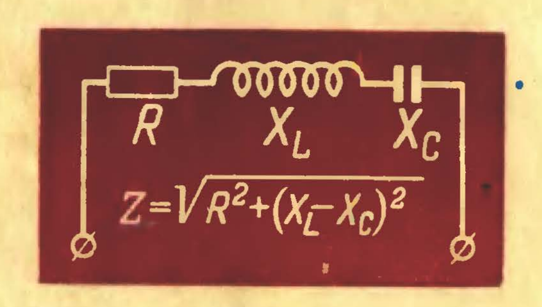


С. С. ВАЙНШТЕЙН
и Д. А. КОНАШИНСКИЙ

ЗАДАЧИ И ПРИМЕРЫ ДЛЯ РАДИОЛЮБИТЕЛЕЙ





ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

Андреев
Анатолий Алексеевич.

МАССОВАЯ РАДИО БИБЛИОТЕКА

ПОД ОБЩЕЙ РЕДАКЦИЕЙ АКАДЕМИКА А. И. БЕРГА

Выпуск 112

С. С. ВАЙНШТЕЙН и Д. А. КОНАШИНСКИЙ

ЗАДАЧИ И ПРИМЕРЫ ДЛЯ РАДИОЛЮБИТЕЛЕЙ

Рекомендовано Управлением технической подготовки Центрального комитета Всесоюзного совета добровольного общества содействия армии в качестве пособия для радиоклубов и радиокружков

PAVEL 49



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА 1951 ЛЕНИНГРАД

"Радио" № 3 - 1952 г. стр. 63

Сборник предназначается в помощь радиолюбителям, желающим освоить принципы элементарных расчетов простейших радиотехнических цепей. В сборнике приводятся необходимые для этого основные формулы из электротехники и радиотехники, дающие возможность расчета отдельных элементов радиоцепей и решения более сложных задач. В систематическом изложении показано применение этих формул на конкретных примерах из области электротехники и радиотехники.

Редактор *И. П. Жеребцов* Техн. редактор *Л. М. Фридкин*

Сдано в набор 6/III 1951 г. Подп. к печ. 15/VI 1951 г.
10,2 уч-изд. л. Формат бумаги $84\times108^1/_{32}$ = $2^3/_4$ бумажных — 9 п. л.
Т-04835 Тираж 25 000 Зак. 1101

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемая вниманию радиолюбителей книга является, попыткой популярного, но в то же время систематического, изложения основных вопросов электротехники и радиотехники в задачах и примерах.

Естественно, что в заданном объеме книги не представлялось возможным охватить все вопросы, интересующие радиолюбителей. Поэтому авторы включили в сборник, главным образом, ряд вопросов из электротехники, значительная часть которых мало освещена в популярной литературе для радиолюбителей, и некоторые радиотехнические расчеты, основанные на использовании общих электротехнических законов.

Книга составлена с таким расчетом, чтобы ею могли пользоваться не только подготовленные радиолюбители, но и радиолюбители, приступающие к систематическому изучению электротехники и радиотехники. С этой целью в каждой главе дано краткое изложение основных законов и расчетных формул и показано их применение к решению простых и более сложных задач электротехники и радиотехники.

В изложении, несомненно, имеется ряд недостатков, за указание которых, равно как и за пожелания по содержанию настоящей книги, авторы будут благодарны читателям.

Авторы

СОДЕРЖАНИЕ

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ПОСТОЯННЫЙ ТОК

1. СОПРОТИВЛЕНИЕ В ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Сопротивление проводников. Сопротивление характеризуется его величиной, измеряемой в омах, и величиной мощности, измеряемой в ваттах, которую можно рассеять на сопротивлении без опасений его перегрева. Величина сопротивления зависит от используемого для него материала и определяется формулой

$$R = \frac{\rho \cdot l}{q} \text{ ом}, \qquad (1\text{-}1)$$

где R — сопротивление, *ом*;
l — длина материала, *м*;
q — площадь поперечного сечения, *мм*²;
ρ — удельное сопротивление материала, *ом·мм²/м*.

Значения ρ для некоторых материалов приведены в табл. 1-1.

Таблица 1-1

Удельные сопротивления некоторых материалов (проводников)

Материал	Удельное сопротивление, $\frac{ом \cdot мм^2}{м}$
Медь электротехническая	0,0175
Алюминий	0,0278
Молибден	0,0476
Вольфрам	0,0612
Железо	0,0918
Манганин	0,43
Никелин	0,4
Константан	0,49
Реотан	0,47
Нихром	1,00

Примеры и задачи.

1-1. Определить величину сопротивления, намотанного из нихромовой проволоки длиной 25 *м* и диаметром $d = 0,2$ *мм.*

Решение. Площадь поперечного сечения проволоки $q = 0,78d^2 = 0,0312$ *мм²*. Так как для нихрома $\rho = 1$ *ом·мм²/м*, то

$$R = \frac{\rho \cdot l}{q} = \frac{1 \cdot 25}{0,0312} \approx 800 \text{ ом.}$$

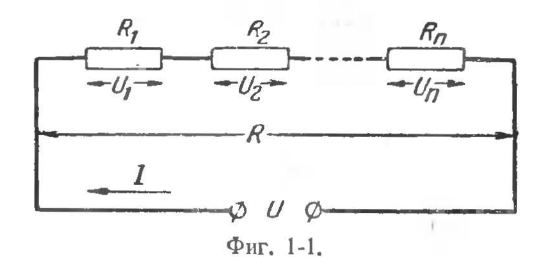
$S = \pi R^2 = 3,14 R^2 = 0,78d^2$

1-2. Рассчитать сопротивление двухпроводной воздушной линии из медных проводов сечением 2,5 *мм²* и длиной 0,5 *км.*

Ответ: 7,0 *ом.*

1-3. Сколько метров манганиновой проволоки диаметром 0,05 *мм* необходимо для изготовления сопротивления в 10 000 *ом*?

Ответ: 45,5 *м.* (46,6 м)



Фиг. 1-1.

Последовательное включение сопротивлений. Общее сопротивление цепи на фиг. 1-1 равно

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \ldots + R_n. \qquad (1\text{-}2)$$

Ток в цепи определяется по закону Ома:

$$I = \frac{U}{R}, \qquad (1\text{-}3)$$

где I — ток, *а*;

U — напряжение, приложенное к цепи, *в*;

R — сопротивление цепи, *ом.*

Падение напряжения на каждом сопротивлении цепи равно

$$U_1 = IR_1; \quad U_2 = IR_2; \ldots U_n = IR_n, \qquad (1\text{-}4)$$

причем

$$U_1 + U_2 + \ldots + U_n = U.$$

Мощность, поглощаемая во всей цепи, равна

$$P = I^2R = \frac{U^2}{R} = IU. \qquad (1\text{-}5)$$

Мощность, поглощаемая в каждом сопротивлении, равна

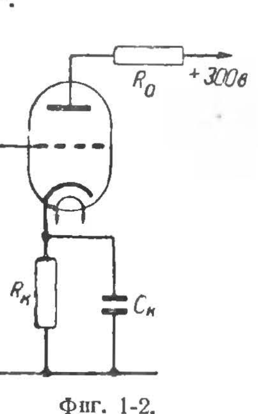
$$P_1 = I^2R_1; \quad P_2 = I^2R_2; \ldots P_n = I^2R_n,$$

причем

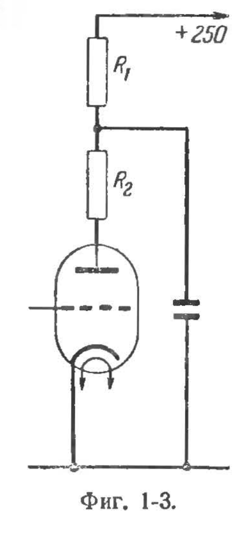
$$P_1 + P_2 + \ldots + P_n = P.$$

Примеры и задачи.

1-4. На сопротивлении автоматического смещения $R_к$ (фиг. 1-2) нужно получить напряжение 24,5 *в* при токе в 35 *ма*. Определить: а) величину сопротивления $R_к$; б) рассеиваемую в нем мощность P.



Фиг. 1-2.



Фиг. 1-3.

Ответ: а) $R_к = 700$ *ом*; б) $P = 0,86$ *вт.*

1-5. Напряжение анодной батареи равно 300 *в*. На анод лампы нужно подать напряжение 230 *в*. Какое сопротивление R_a нужно включить в цепь анода (фиг. 1-2), если ток анода равен 8 *ма*?

Ответ: 8 750 *ом.*

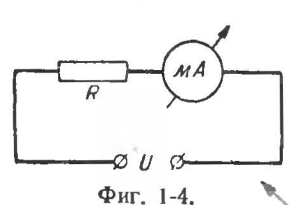
1-6. Нагрузочное сопротивление R_2 в схеме фиг. 1-3 равно 100 000 *ом*, а сопротивление развязки $R_1 = 10\,000$ *ом.* Анодный ток равен 1,4 *ма.*

а) Найти полное падение напряжения на сопротивлениях R_1 и R_2;

б) определить напряжение на аноде, если напряжение анодной батареи равно 250 *в*.

Ответ: а) 154 *в*; б) 96 *в*.

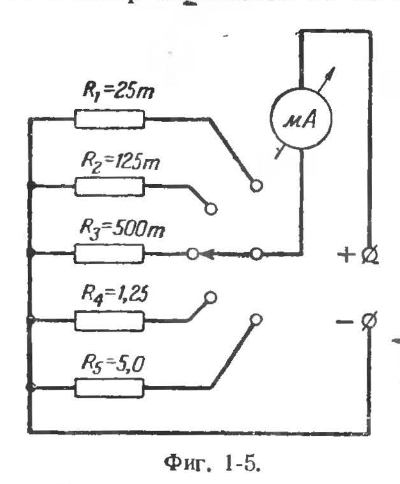
1-7. Напряжение анодной батареи равно 320 *в*. На аноды двух ламп, питаемых параллельно, необходимо подать 210 *в* при токах через лампы 3 и 5 *ма*. Найти: а) величину гасящего сопротивления и б) мощность, рассеиваемую в нем.



Фиг. 1-4.

Ответ: а) $R = 13\,750$ *ом*;
б) $P = 0{,}88$ *вт*.

1-8. Миллиамперметр на максимальный ток в 1 *ма* необходимо использовать как вольтметр со шкалой на 50 *в*. Как это можно сделать?



Фиг. 1-5.

Решение. Необходимо последовательно с миллиамперметром включить добавочное сопротивление R (фиг. 1-4). Так как сопротивление самого прибора мало по сравнению с добавочным сопротивлением, то можно считать, что все напряжение падает на сопротивлении R и тогда

$$R = \frac{50}{1 \cdot 10^{-3}} = 50\,000 \text{ ом}.$$

1-9. Микроамперметр на 200 *мка* необходимо использовать для измерения напряжений в диапазонах: 0—5, 0—25, 0—100 0—250 и 0—1000 *в*.

Составьте схему прибора и рассчитайте нужные величины добавочных сопротивлений.

Ответ: Схема и ее данные приведены на фиг. 1-5.

1-10. Чему равно сопротивление в омах на вольт миллиамперметра со шкалой на 5 *ма*, когда он используется как вольтметр?

Решение. Так как $R = \frac{U}{I}$, то, очевидно, что на один вольт сопротивление будет равно $\frac{R}{U} = \frac{1}{I} = \frac{1}{5 \cdot 10^{-3}} = 200$ *ом/в*.

$R = \frac{U}{I} = \frac{1}{5 \cdot 10^{-3}} = 200$ ом/вольт

1-11. Вольтметр имеет сопротивление 500 *ом/в*. Чему равен максимальный ток через прибор?

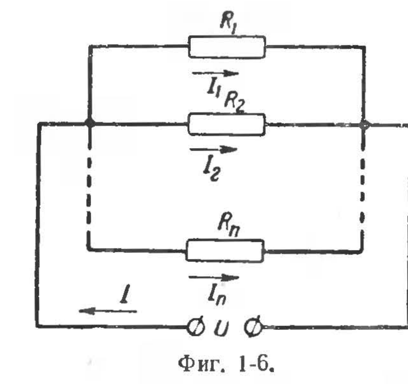
Ответ: 2 *ма*. $R = 500$ $U = 1$ $I = \frac{U}{R} = \frac{1}{500} = 2$ ма.

Параллельное включение сопротивлений. Общее сопротивление цепи фиг. 1-6 равно

$$R = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \ldots + \frac{1}{R_n}}. \qquad (1\text{-}6)$$

Ток в общей цепи равен

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \ldots I_n, \qquad (1\text{-}7)$$



Фиг. 1-6.

где $I_1 = \frac{U}{R_1}$; $I_2 = \frac{U}{R_2}$;

$I_3 = \frac{U}{R_3}$; ... $I_n = \frac{U}{R_n}$.

Падение напряжения на каждом сопротивлении равно приложенному к цепи напряжению, т. е.

$$U_1 = U_2 = U_3 = \ldots = U_n = U. \qquad (1\text{-}8)$$

Мощность, поглощаемая в цепи, равна

$$P = I^2 R = \frac{U^2}{R} = IU. \qquad (1\text{-}9)$$

Мощность, поглощаемая в каждом сопротивлении, равна

$$P_1 = I_1^2 R_1;\ P_2 = I_2^2 R_2;\ P_3 = I_3^2 R_3;\ \ldots\ P_n = I_n^2 R_n,$$

причем

$$P_1 + P_2 + P_3 + \ldots + P_n = P.$$

В наиболее часто встречающемся на практике случае параллельного включения двух сопротивлений формула (1-6) принимает вид

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}.$$

Если сопротивления R_1, R_2 и т. д. равны друг другу, то

$$R = \frac{R_1}{n},$$

где n — число параллельно включенных одинаковых сопротивлений.

Примеры и задачи.

1-12. Необходимо сопротивление в 15 000 *ом* уменьшить до 6 000 *ом*. Как это можно сделать?

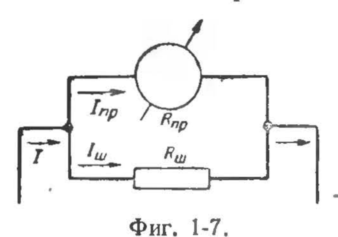
Ответ: Включить параллельно сопротивление в 10 000 *ом*.

1-13. Сколько сопротивлений по 60 000 *ом* каждое нужно включить параллельно, чтобы общее сопротивление получить равным 20 000 *ом*?

Ответ: 3.

1-14. Имеется набор сопротивлений с допустимой мощностью рассеяния в каждом 1 *вт*. Необходимо получить сопротивление в 10 000 *ом* на мощность в 2 *вт*. Как это можно проще всего сделать?

Ответ: Включить параллельно два сопротивления по 20 000 *ом* каждое или два сопротивления по 5 000 *ом* последовательно.



Фиг. 1-7.

1-15. Миллиамперметр на полный ток 1 *ма* имеет сопротивление 18 *ом*. Желательно использовать этот прибор для измерения токов до 10 *ма*. Как это сделать?

Решение. Необходимо параллельно прибору включить такое сопротивление (фиг. 1-7), чтобы через прибор проходил ток только в 1 *ма*, а остальной ток 9 *ма* проходил через сопротивление $R_ш$ (шунт). Так как токи в ветвях параллельной цепи обратно пропорциональны сопротивлениям, то можно написать (фиг. 1-7):

$$\frac{I_{пр}}{I_ш} = \frac{R_ш}{R_{пр}},$$

где $I_{пр}$ и $R_{пр}$ — ток через прибор и сопротивление прибора;
$I_ш$ и $R_ш$ — ток через шунт и сопротивление шунта.

В нашем случае $\frac{1}{9} = \frac{R_ш}{18}$, откуда $R_ш = 2$ *ом*.

1-16. Сопротивление прибора на 200 *мка* равно 100 *ом*. Подобрать к нему шунт для измерения токов до 0,1 *а*.

Ответ: $R_ш \approx 0{,}2$ *ом*.

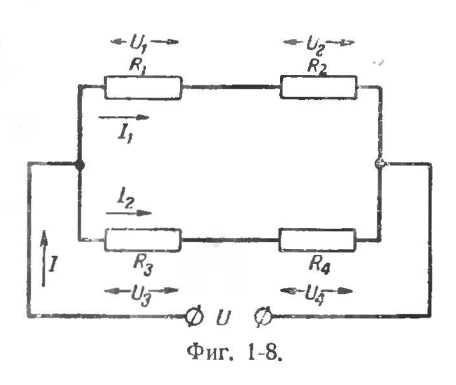
1-17. Сопротивление прибора равно 60 *ом*. Максимальное отклонение стрелки в нем получается при токе 0,5 *ма*. К прибору добавляется шунт сопротивлением 20 *ом*. Какой максимальный ток может при этом отсчитывать прибор?

Ответ: 2 *ма*. (15 ма)

1-18. В приемнике „Родина" применяются лампы: 2А1 (СБ-242) — 1 шт., 2К2 (2К2М) — 2 шт. и 2Ж2 (2Ж2М) — 3 шт. Нити накала ламп включены параллельно. Определить: а) общий ток и мощность, потребляемую нитями ламп; б) с каким сопротивлением нужно взять реостат, если цепь накала питается от аккумулятора с напряжением 2,5 *в*.

Ответ: а) $I_н = 0{,}46$ *а*, $P = 0{,}92$ *вт*;
б) $R = 1{,}1$ *ом*.

В момент включения напряжения через нити накала пройдет большой ток (нити в холодном состоянии обладают очень малым сопротивлением), и чтобы не пережечь этим броском тока нити, сопротивление реостата надо увеличить. Его следует рассчитать так, чтобы в момент включения ток не превышал двойного значения нормального тока накала. Приближенно можно считать, что в момент включения все напряжение источника $U_{ист}$ падает на реостат, и тогда $R_{макс} \approx \frac{U_{ист}}{2I_н}$. В данном случае необходим реостат с максимальным сопротивлением приблизительно 2,7 *ом*. После прогрева нитей сопротивление реостата уменьшают до его нормальной величины 1,1 *ом*.



Фиг. 1-8.

Смешанное включение сопротивлений. Общий принцип решения таких цепей состоит в применении законов последовательного и параллельного соединений к отдельным участкам и ветвям цепи, а затем ко всей цепи в целом. В частном случае цепи фиг. 1-8, имеющей две

ветви, каждая из которых представляет собой последовательное соединение двух сопротивлений, получаем:

1. Общее сопротивление

$$R=\frac{(R_1+R_2)(R_3+R_4)}{(R_1+R_2)+(R_3+R_4)}. \qquad (1\text{-}10)$$

2. $U_1+U_2=U_3+U_4=U.$ (1-11)

3. $I=I_1+I_2=\frac{U}{R},$ (1-12)

где $I_1=\frac{U}{R_1+R_2}$; $I_2=\frac{U}{R_3+R_4}$.

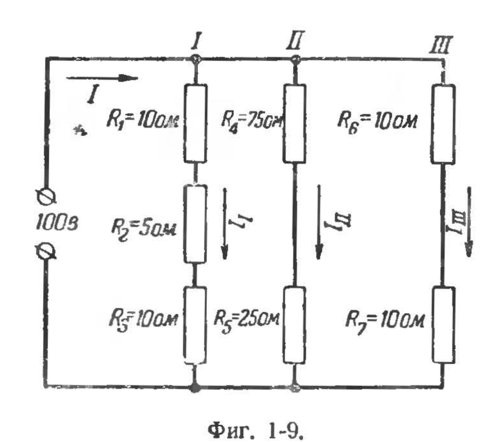
4. Мощность, расходуемая в цепи, равна

$$P=I^2R=\frac{U^2}{R}=IU=P_1+P_2+P_3+P_4, \qquad (1\text{-}13)$$

где $P_1=I_1^2R_1$; $P_2=I_1^2R_2$; $P_3=I_2^2R_3$; $P_4=I_2^2R_4$.

Примеры и задачи.

1-19. Рассчитать общее сопротивление, ток и мощность в цепи фиг. 1-9. Рассчитать токи, напряжения и мощности в каждой ветви цепи.



Фиг. 1-9.

Решение

$R_{I\ группы}=R_1+R_2+R_3=10+5+10=25$ *ом*;

$R_{II\ группы}=R_4+R_5=75+25=100$ *ом*;

$R_{III\ группы}=R_6+R_7=10+10=20$ *ом*;

$$R=\frac{1}{\frac{1}{R_I}+\frac{1}{R_{II}}+\frac{1}{R_{III}}}=\frac{1}{\frac{1}{25}+\frac{1}{100}+\frac{1}{20}}=10 \text{ ом}.$$

$$I=\frac{U}{R}=10 \text{ а}.$$

$$P=UI=100\cdot 10=1\,000 \text{ вт}.$$

Ток в первой группе $I_I=\frac{U}{R_I}=\frac{100}{25}=4$ *а*;

Ток во второй группе $I_{II}=\frac{U}{R_{II}}=\frac{100}{100}=1$ *а*;

Ток в третьей группе $I_{III}=\frac{U}{R_{III}}=\frac{100}{20}=5$ *а*.

$I_I+I_{II}+I_{III}==4+1+5=10$ *а* $=I$.

Падения напряжения на соответствующих сопротивлениях и теряемые в них мощности:

$U_1=I_IR_1=4\cdot 10=40$ *в*;
$U_2=I_IR_2=4\cdot 5=20$ *в*;
$U_3=I_IR_3=4\cdot 10=40$ *в*.
$U_1+U_2+U_3=40+20+40=100$ *в* $=U$.

$U_4=I_{II}R_4=1\cdot 75=75$ *в*;
$U_5=I_{II}R_5=1\cdot 25=25$ *в*.
$U_4+U_5=75+25=100$ *в* $=U$.

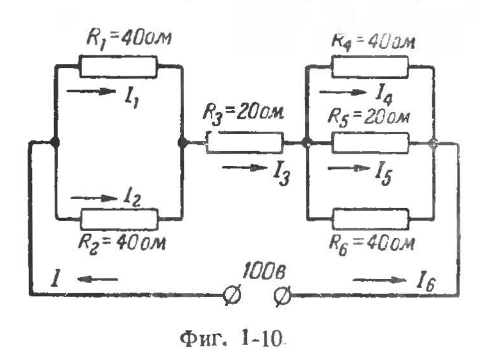
$U_6=I_{III}R_6=5\cdot 10=50$ *в*;
$U_7=I_{III}R_7=5\cdot 10=50$ *в*.
$U_6+U_7=50+50=100$ *в* $=U$.

$P_1=I_I^2R_1=4^2\cdot 10=160$ *вт*;
$P_2=I_I^2R_2=4^2\cdot 5=80$ *вт*;
$P_3=I_I^2R_3=4^2\cdot 10=160$ *вт*;
$P_4=I_{II}^2R_4=1^2\cdot 75=75$ *вт*;
$P_5=I_{II}^2R_5=1^2\cdot 25=25$ *вт*;
$P_6=I_{III}^2R_6=5^2\cdot 100=250$ *вт*;
$P_7=I_{III}^2R_7=5^2\ 100=250$ *вт*.

$P_1+P_2+P_3+P_4+P_5+P_6+P_7=1\,000$ *вт*.

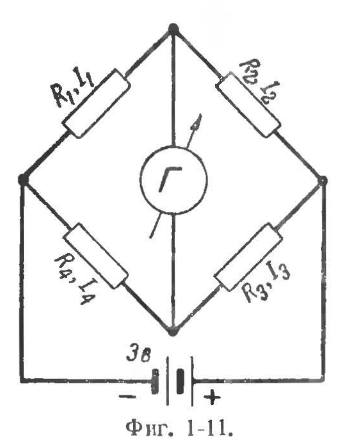
1-20. Рассчитать общее сопротивление, токи и мощность в цепи, показанной на фиг. 1-10. Рассчитать ток и мощность в каждом сопротивлении.

Ответ: $R=50$ *ом*, $I=2$ *а*, $P=200$ *вт*, $I_1=I_2=1$ *а*, $I_3=2$ *а*, $I_4=I_6=0{,}5$ *а*, $I_5=1$ *а*, $P_1=P_2=40$ *вт*, $P_3=80$ *вт*, $P_4=P_6=10$ *вт*, $P_5=20$ *вт*.

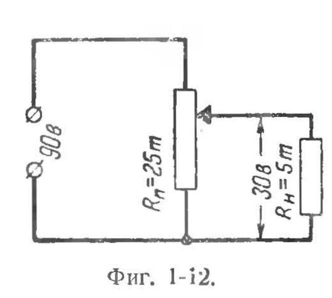


Фиг. 1-10.

1-21. Составлен мостик (фиг. 1-11) для измерения сопротивления R_3. Сопротивления R_1 и R_2 равны соответственно 100 и 300 *ом*. При отсутствии тока в цепи гальванометра сопротивление $R_4=200$ *ом*. Найти токи I_1, I_2, I_3 и I_4, общее сопротивление R и общий ток I.



Фиг. 1-11.



Фиг. 1-12.

Ответ: $I_1=I_2=0{,}0075$ *а* $=7{,}5$ *ма*;
$I_3=I_4=0{,}00375$ *а* $=3{,}75$ *ма*;
$R=266{,}6$ *ом*;
$I=11{,}25$ *ма*.

Потенциометры и делители напряжения.

1-22. Потенциометр с сопротивлением $R_п=25\,000$ *ом* включен на напряжение 90 *в* (фиг. 1-12). Чему равен ток в каждой части потенциометра, если на нагрузочное сопротивление $R_н$ в 5 000 *ом* с нижней части потенциометра подается напряжение 30 *в*?

Решение. Схему фиг. 1-12 можно заменить эквивалентной ей схемой фиг. 1-13. Параллельное включение сопротивлений R_1 и $R_н$ дает общее сопротивление $R=\frac{R_1R_н}{R_1+R_н}$. Так как падения напряжений на сопротивлениях пропорциональны величинам этих сопротивлений, то можно написать, что $\frac{U_1}{U}=\frac{R}{R_2}$ или $\frac{30}{60}=\frac{R}{R_2}$, откуда $R_2=2R$. С другой стороны, имеем, что $R_2=R_п-R_1$. Тогда последнее уравнение принимает вид: $R_п-R_1=2R$ или, подставляя вместо R его значение, получаем: $R_п-R_1=\frac{2R_1R_н}{R_1+R_н}$.

Фиг. 1-13.

Умножая обе части этого уравнения на $(R_1+R_н)$, получаем $(R_1+R_н)\times(R_п-R_1)=2R_1R_н$.

Раскрывая скобки, получаем

$$R_пR_1-R_1^2+R_пR_н-R_1R_н=2R_1R_н$$

или, после перенесения всех членов в правую часть,

$$2R_1R_н-R_пR_н+R_1^2-R_пR_н+R_1R_н=0$$

или окончательно

$$R_1^2+R_1(3R_н-R_п)-R_пR_н=0.$$

Подставляем в это уравнение вместо $R_п$ и $R_н$ их числовые значения:

$$R_1^2+R_1(3\cdot5\,000-25\,000)-25\,000\cdot5\,000=0$$

или $R_1^2-10\,000\,R_1-125\,000\,000=0$.

Решая это квадратное уравнение, получаем

$$R_1=\frac{10\,000\pm\sqrt{10\,000^2+4\cdot125\,000\,000}}{2}=\frac{10\,000\pm\sqrt{10^8+5\cdot10^8}}{2}=$$

$$=\frac{10\,000\pm\sqrt{6\cdot10^8}}{2}=\frac{10\,000\pm2{,}46\cdot10^4}{2}.$$

Так как сопротивление отрицательным быть не может, то

$$R_1 = \frac{10\,000 + 2,46\cdot 10^4}{2} = 1,73\cdot 10^4.$$

Тогда, следовательно, ток через сопротивление R_1 будет равен

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1} = \frac{30}{1,73\cdot 10^4} = 1,73\cdot 10^{-3}\,a = 1,73\ ма.$$

Так как ток через $R_н$ равен

$$I_н = \frac{U_1}{R_н} = \frac{30}{5\,000} = 0,006\ a = 6\ ма,$$

то ток через R_2 будет равен

$$I_2 = I_1 + I_н = 1,73 + 6 = 7,73\ ма.$$

1-23. 1) К какой части потенциометра предыдущей задачи нужно подключить то же нагрузочное сопротивление в 5 000 *ом*, чтобы получить на нем напряжение в 45 *в*? 2) Найти токи в соответствующих частях потенциометра.

Ответ: 1) $R_1 \approx 21\,000$ *ом*; 2) $I_2 \approx 9$ *ма*; $I_1 \approx 2,14$ *ма*.

Фиг. 1-14.

1-24. Для супергетеродинного приемника необходимо подать от выпрямителя напряжения на аноды, экранные и управляющие сетки через делитель напряжения (фиг. 1-14). Токи и напряжения показаны на схеме. Полный ток, отбираемый от выпрямительной установки, равен 80 *ма*. Определить необходимые величины сопротивлений, составляющих делитель.

Решение. Анодный ток всех ламп приемника равен 57 *ма* при напряжении 250 *в*; ток экранных сеток — 5,4 *ма* при напряжении 100 *в*; цепи управляющих сеток тока не потребляют; следовательно, через секцию III делителя напряжения будет проходить полностью ток 80 *ма*. Через секцию I делителя будет проходить ток 80 — 57 = 23 *ма*, и падение напряжения на ней равно $U_1 = 250 - 100 = 150$ *в*. Следовательно, $R_I = \frac{U_1}{23\cdot 10^{-3}} = \frac{150}{23\cdot 10^{-3}} = 6\,530$ *ом*.

Аналогично, через вторую секцию R_{II} будет проходить ток $23 - 5,4 = 17,6$ *ма*; следовательно, $R_{II} = \frac{100}{17,6\cdot 10^{-3}} = 5\,630$ *ом*.

Сопротивление R_1 секции III определится как $R_1 = \frac{U_3}{80\cdot 10^{-3}} = \frac{2}{80\cdot 10^{-3}} = 25$ *ом*.

Сопротивление R_2 секции III равно $R_2 = \frac{U_4}{80\cdot 10^{-3}} = \frac{3-2}{80\cdot 10^{-3}} = 12,5$ *ом*.

Сопротивление R_3 секции III равно $R_3 = \frac{U_5}{80\cdot 10^{-3}} = \frac{16,5-3}{80\cdot 10^{-3}} = 169$ *ом*.

Полное сопротивление делителя равно

$$R_I + R_{II} + R_1 + R_2 + R_3 = 6\,530 + 5\,630 + 25 + 12,5 + 169 = 12\,416,5\ ом.$$

1-25. Определить значение сопротивлений, составляющих делитель напряжения для питания следующих каскадов приемника:

	U_a *в*	U_{c2} *в*	I_a *ма*	I_{c2} *ма*
Преобразователь частоты . .	250	100	3,5	2,7
Усилитель промежуточной частоты	250	100	9,2	2,6
Детекторный каскад	250	—	0,9	—
Выходной каскад	250	250	32,0	5,5

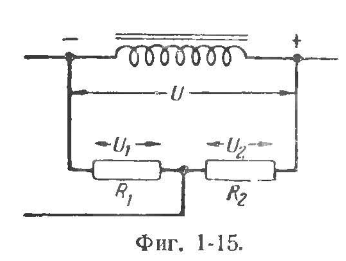
Управляющие сетки получают автоматическое смещение от отдельных сопротивлений. Потребляемый от выпрямителя ток составляет 60 *ма*.

Ответ: 16 850 *ом*; 27 800 *ом*.

1-26. Катушка возбуждения громкоговорителя с сопротивлением постоянному току 1 500 *ом* используется в качестве сглаживающего дросселя. Каким образом можно получить от нее напряжение смещения 6 *в* при полном токе питания приемника 60 *ма*?

Решение. Падение напряжения на дросселе равно $1\,500 \times 60 \cdot 10^{-3} = 90$ *в*. Включаем на зажимы дросселя (фиг. 1-15) делитель напряжения и подбираем R_1 так, чтобы получить нужное смещение: $U_1 = \frac{UR_1}{R_1 + R_2}$ или $6 = \frac{90 \cdot R_1}{R_1 + R_2}$, откуда находим, что $R_2 = 14R_1$, т. е. R_2 должно быть в 14 раз больше R_1. Если $R_1 = 10\,000$ *ом*, то $R_2 = 140\,000$ *ом*.

1-27. Параллельно сглаживающему дросселю включен делитель напряжения из последовательно соединенных сопротивлений $R_1 = 1$ *мгом*; $R_2 = 110\,000$ *ом*; $R_3 = 15\,000$ *ом*; $R_4 = 15\,000$ *ом*. Сопротивление постоянному току обмотки дросселя равно 1 600 *ом* и через нее проходит ток 50 *ма*. Какие напряжения можно получить с этих сопротивлений?



Фиг. 1-15.

Ответ: 70,2 *в*; 7,7 *в*; ~1 *в*; ~1 *в*.

2. ИНДУКТИВНОСТЬ В ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

При всяком изменении величины тока в электрической цепи проявляется индуктивность цепи, характеризующаяся двумя основными свойствами: а) индуктивность стремится противодействовать всякому изменению тока в цепи; б) изменение тока в цепи индуктирует в ней самой э. д. с. самоиндукции, определяемую формулой

$$E = L\frac{I}{t}, \qquad (1\text{-}14)$$

где L — индуктивность цепи;

$\frac{I}{t}$ — скорость изменения тока в цепи.

Если изменение тока происходит со скоростью 1 *а* в 1 *сек.* и при этом в цепи индуктируется э. д. с. в 1 *в*, то индуктивность L цепи равна 1 генри (*гн*).

Индуктивность проводов. Индуктивность длинного одиночного, параллельного земле проводника длиной 1 метр, равна

$$L = 0{,}46 \lg \frac{4h}{d} \text{ мкгн/м}. \qquad (1\text{-}15)$$

Здесь: h - высота проводника над землей в метрах
d - диаметр провода в метрах

Индуктивность двухпроводной линии из двух длинных параллельных проводов

$$L = 0{,}92 \lg \frac{2D}{d} \text{ мкгн/м}. \qquad (1\text{-}16)$$

В этих формулах: d — диаметр провода; h — высота провода над землей; D — расстояние между центрами проводов. Размеры выражены в одинаковых единицах. (в метрах)

Индуктивность концентрического кабеля

$$L = 0{,}46 \lg \frac{D}{d} \text{ мкгн/м}, \qquad (1\text{-}17)$$

где d — внешний диаметр внутреннего проводника;
D — внутренний диаметр внешнего проводника.

Размеры выражены в одинаковых единицах.

Индуктивность одиночного квадратного витка

$$L = 0{,}0184\, a\left(\lg \frac{2a}{d} - 0{,}33\right) \text{ мкгн}, \qquad (1\text{-}18)$$

где a — сторона квадрата, *см*;
d — диаметр провода, *см*.

Задачи.

1-28. Чему равна индуктивность одиночного провода длиной 25 *м*, подвешенного над землей на высоте 15 *м*? Диаметр провода равен 2 *мм*.

Ответ: 51,5 *мкгн*.

1-29. Чему равна индуктивность двухпроводной линии, состоящей из проводов диаметром 2 *мм*, с расстоянием между центрами проводов 0,5 *м*? Длина линии равна 15 *м*.

Ответ: 37 *мкгн*.

1-30. Определить индуктивность концентрического кабеля, внешний диаметр которого равен 10 *см* и диаметр внутреннего проводника — 5 *мм*. Длина кабеля — 10 *м*.

Ответ: 6 *мкгн*.

1-31. Определить индуктивность квадратной рамки со стороной 6 *м*, сделанной из провода диаметром 2 *мм*.

Ответ: 38 *мкгн*.

Электродвижущая сила самоиндукции и индуктивность катушек. Э. д. с. самоиндукции катушки, из w витков определяется формулой

$$E = \frac{w\,\Phi}{t}\cdot 10^{-8}\ в, \qquad (1\text{-}19)$$

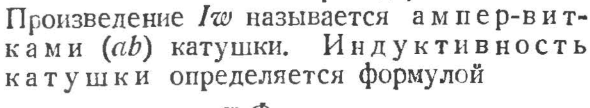
где Φ — магнитный поток в максвеллах (*мкс*);
t — время, *сек*.

Магнитный поток Φ определяется формулой: $\Phi = B\cdot S$, где B — магнитная индукция в гауссах (*гс*); S — площадь, пронизываемая магнитным потоком, *см*^{2}. Магнитная индукция в свою очередь равна

$$B = 1{,}256\cdot\frac{\mu I w}{l}, \qquad (1\text{-}20)$$

где μ — магнитная проницаемость среды (сердечника катушки);
I — ток в катушке, *а*;
w — число витков катушки;
l — средняя длина магнитопровода, *см*.

Фиг. 1-16.



Произведение Iw называется ампер-витками (*ав*) катушки. Индуктивность катушки определяется формулой

$$L = \frac{w\cdot\Phi}{I}\cdot 10^{-8}\ гн, \qquad (1\text{-}21)$$

где произведение $w\Phi$ — потокосцепление, соответствующее току I *а*.

В соответствии с вышеприведенными формулами

Фиг. 1-17.

$$L = \frac{1{,}256\cdot\mu\cdot w^2 S}{l}\cdot 10^{-8}\ гн, \qquad (1\text{-}22)$$

где μ — магнитная проницаемость среды, через которую проходит магнитный поток катушки;
w — число витков катушки;
S — площадь сечения магнитопровода, *см*^{2};
l — длина магнитопровода, *см*.

1) Для однослойной цилиндрической катушки (фиг. 1-16), у которой длина b больше ее радиуса a, индуктивность равна

$$L = \frac{a^2 w^2}{23a + 25b}\ мкгн. \qquad (1\text{-}23)$$

В случае $b < a$ расчет ведется по формуле

$$L = \frac{a^2 w^2}{20a + 28b}\ мкгн. \qquad (1\text{-}23a)$$

2) Для однослойной плоской катушки (фиг. 1-17)

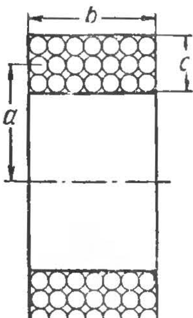
$$L = \frac{a^2 w^2}{20a + 28c}\ мкгн. \qquad (1\text{-}24)$$

3) Для многослойной катушки (фиг. 1-18)

$$L = \frac{a^2\cdot w^2}{19a + 28b + 31c}\ мкгн. \qquad (1\text{-}25)$$

В этих формулах w — число витков; размеры a, b, c — в *см*.

Энергия, которая должна быть затрачена на создание магнитного поля и которая содержится в этом поле, определяется как



Фиг. 1-18.

$$W = \frac{LI^2}{2}\ вт\text{-}сек, \qquad (1\text{-}26)$$

где L — индуктивность, *гн*;
I — ток, *а*.

Примеры и задачи.

1-32. С катушкой, имеющей 300 витков, связан магнитный поток в 1 800 000 *мкс*, который уменьшается от максимального значения до нуля в течение 0,18 сек. Определить:

а) индуктируемую в катушке э. д. с. самоиндукции;
б) индуктивность катушки, если данному потокосцеплению соответствует ток 1 *а*;
в) энергию, которая была запасена в магнитном поле катушки;
г) мощность, расходуемую магнитным полем.

Решение.

1) $E = \frac{w \cdot \Phi}{t} \cdot 10^{-8} = \frac{300 \cdot 1\,800\,000}{0,18} \cdot 10^{-8} = 30$ *в*;

2) $L = \frac{w \cdot \Phi}{I} \cdot 10^{-8} = \frac{300 \cdot 1\,800\,000}{1} \cdot 10^{-8} = 5,4$ *гн*;

3) $W = \frac{LI^2}{2} = \frac{5,4 \cdot 1^2}{2} = 2,7$ *вт-сек*;

4) $P = \frac{W}{t} = \frac{2,7}{0,18} = 15$ *вт*.

1-33. Магнитный поток в 20 000 *мкс* создается в катушке, имеющей 200 витков, током в 50 *ма*. а) Чему равна индуктируемая в катушке э. д. с., если ток уменьшается до нуля за 0,025 сек.? б) Чему равна индуктивность катушки? в) Чему равна запасенная в магнитном поле энергия?

Ответ: а) 1,6 *в*; б) 0,8 *гн*; в) 0,001 *вт-сек*.

1-34. Катушка состоит из 300 витков, намотанных на немагнитной изоляционной трубе диаметром 4 *см* и длиной 40 *см*.

Найти индуктивность катушки.

Решение. Находим площадь $S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 4^2}{4} = 12,56$ *см*². Тогда согласно формуле (1-22) индуктивность равна

$$L = \frac{1,256 \cdot 300^2 \cdot 1 \cdot 12,56}{40} \cdot 10^{-8} = 0,000356 \text{ гн} = 356 \text{ мкгн.}$$

1-35. Сколько витков необходимо намотать на фибровую трубку диаметром 4 *см* и длиной 20 *см*, чтобы получить индуктивность в 250 *мкгн*?

Ответ: 179 витков.

1-36. Если в катушку предыдущей задачи поместить магнитный сердечник из материала с магнитной проницаемостью $\mu = 4\,000$, то чему будет равна ее индуктивность?

Ответ: $L = 1,424$ *гн*.

1-37. Определить индуктивность первичной и вторичной обмоток выходного трансформатора с сердечником типа Ш-20, если площадь сечения сердечника $S = 5,8$ *см*², средняя длина магнитопровода $l = 19,6$ *см*,

число витков первичной обмотки $w_1 = 1\,950$ и вторичной $w_2 = 38$ и если магнитная проницаемость материала сердечника $\mu = 1\,700$.

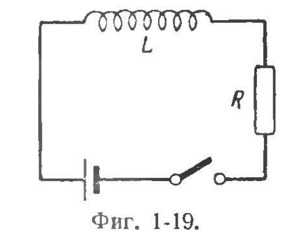
Ответ: $L_1 = 24$ *гн*; $L_2 = 9,2$ *мгн*.

1-33. Чему равна индуктивность многослойной катушки, имеющей 1 200 витков и размеры (фиг. 1-18): $a = 38$ *мм*, $b = 19$ *мм*, $c = 38$ *мм*?

Ответ: 85 *мгн*.

1-39. Чему равна индуктивность каждой из следующих катушек: а) плоской катушки (фиг. 1-17), у которой $w = 32$ витка, $a = 28$ *мм*, $c = 32$ *мм*; б) однослойной цилиндрической катушки (фиг. 1-16), у которой $w = 320$ витков, $a = 16$ *мм*, $b = 125$ *мм*; в) многослойной катушки, у которой $w = 100$ витков, $a = 25$ *мм*, $b = 50$ *мм*, $c = 20$ *мм*?

Ответ: а) 55 *мкгн*; б) 750 *мкгн*; в) 250 *мкгн*.



Фиг. 1-19.

Постоянная времени в цепи с индуктивностью. Нарастание и спадание тока в цепи фиг. 1-19 определяется постоянной времени

$$\tau = \frac{L}{R}, \tag{1-27}$$

которая показывает, по истечении какого времени с момента включения ток достигнет 63% от своего конечного максимального значения $I_к$ или по истечении какого времени этот ток $I_к$ в участке цепи, обладающем L и R, уменьшится до 37% от его значения, если этот участок замкнуть накоротко.

Время, нужное для нарастания или спадания тока в такой цепи до любой величины, можно определить из формулы

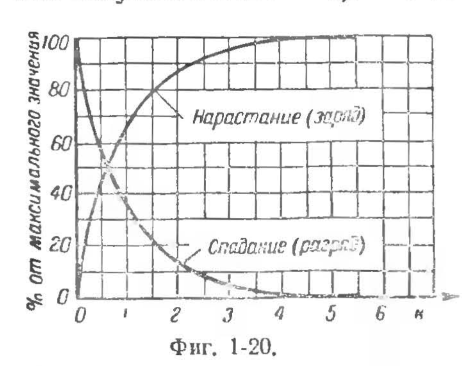
$$t = k\tau = k\frac{L}{R}, \tag{1-28}$$

где k определяется из кривой фиг. 1-20 в зависимости

от того, сколько процентов составляет ток от своего максимального значения.

Примеры и задачи.

1-40. Цепь, состоящая из последовательно включенных индуктивности $L=0,5$ *гн* и сопротивления $R=12$ *ом*, подключена к батарее с напряжением 6 *в* и предназначена для срабатывания реле. а) Если реле срабатывает при токе, равном 63% от его максимального значения в цепи реле, то через какое время после включения батареи реле сработает? б) Если реле срабатывает при 400 *ма*, то сколько времени пройдет между включением батареи и срабатыванием реле?



Фиг. 1-20.

Решение.

а) $\tau=\frac{L}{R}=\frac{0,5}{12}=0,0416$ сек.;

б) Максимальный в цепи реле ток равен $I=\frac{U}{R}=\frac{6}{12}=0,5$ *а*.

Ток срабатывания реле составляет $\frac{400}{500}\cdot 100=80\%$ от I.

Из кривой фиг. 1-22 для данного значения тока находим соответствующее значение $k\approx 1,6$. Следовательно, $t=k\frac{L}{R}=$ $=\frac{1,6\cdot 0,5}{12}=0,066$ сек.

1-41. Реле обладает индуктивностью $L=10$ *гн* и должно срабатывать через 0,02 сек. после включения в его цепь тока. Какое необходимо включить последовательно с реле сопротивление, чтобы оно срабатывало при токе: а) в 63% от конечного значения тока в цепи, б) при 80% от конечного значения тока?

Ответ: а) 500 *ом*; б) 800 *ом*.

Взаимоиндуктивность. Взаимоиндуктивность двух катушек определяется формулой

$$M=k\sqrt{L_1L_2}, \qquad (1\text{-}29)$$

где M, L_1 и L_2 выражены в одинаковых единицах; k — коэффициент связи.

Коэффициент связи в различных практических случаях может принимать значение от 1 до 0. Обычно коэффициент связи выражается в процентах.

Иногда величину связи подразделяют следующим образом:

очень слабая связь — $k<1\%$, например связь между волномером и измеряемым контуром, связь между передающей и приемной антеннами;

слабая связь — $k<5\%$, например связь в трансформаторах промежуточной частоты;

сильная связь — $k<90\%$, например связь между выходным каскадом передатчика и передающей антенной;

очень сильная связь — $k>90\%$, например связь между катушками с общим ферромагнитным сердечником.

Задачи.

1-42. Определить взаимоиндуктивность двух катушек с индуктивностями $L_1=0,04$ *мгн* и $L_2=0,01$ *мгн*, если коэффициент связи между ними $k=50\%$.

Ответ: 0,01 *мгн*.

1-43. Катушки трансформатора промежуточной частоты L_1 и L_2 имеют каждая индуктивность 605 *мкгн*, а коэффициент связи между ними $k=1,6\%$. Определить взаимоиндуктивность M.

Ответ: $M=9,7$ *мкгн*.

1-44. Определить коэффициент связи для случая задачи 1-37, если взаимоиндуктивность $M=0,46$ *гн*.

Ответ: $k=98\%$.

Последовательное и параллельное включения индуктивностей. При последовательном включении индуктивностей L_1, L_2, L_3 и т. д. в случае

отсутствия между ними связи общая индуктивность L равна

$$L = L_1 + L_2 + L_3 + \dots \qquad (1\text{-}30)$$

При параллельном включении индуктивностей L_1, L_2, L_3 и т. д. в случае отсутствия связи между ними общая индуктивность L равна

$$L = \frac{1}{\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \dots}. \qquad (1\text{-}31)$$

Для случая параллельного включения двух индуктивностей

$$L = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2}. \qquad (1\text{-}31a)$$

Задачи.

1-44. Две катушки с индуктивностями $L_1 = 20$ *мкгн* и $L_2 = 40$ *мкгн* включены: а) последовательно; б) параллельно. Чему равны результирующие индуктивности?

Ответ: а) 60 *мгн*, б) 13, 33 *мкгн*.

1-45. Две экранированные друг от друга катушки соединены последовательно. Индуктивности катушек $L_1 = 200$ *мкгн* и $L_2 = 100$ *мкгн*. Какова общая индуктивность цепи?

Фиг. 1-21.

Ответ: 300 *мкгн*.

1-46. Чему равна общая индуктивность цепи, если катушки предыдущей задачи включены параллельно?

Ответ: 66,6 *мкгн*.

При последовательном включении индуктивностей и при наличии между ними связи (фиг. 1-21) общая индуктивность определяется формулой

$$L = L_1 + L_2 \pm 2M, \qquad (1\text{-}32)$$

где знак (+) относится к включению индуктивностей согласно фиг 1-21,*а*; знак (—) соответствует включению согласно фиг. 1-21,*б*.

Примеры и задачи.

1-47. Две катушки, каждая с индуктивностью по 4 *мгн*, включены последовательно так, что: а) их магнитные поля складываются, и коэффициент связи между катушками равен 50%; б) катушки включены навстречу (их магнитные поля вычитаются), и коэффициент связи между ними равен 50%; в) катушки включены навстречу и коэффициент связи равен нулю.

Определить в каждом случае результирующую индуктивность.

Решение. При $k = 50\%$ взаимоиндуктивность M согласно формуле 1-29 равна 2 *мгн*. Тогда результирующая индуктивность согласно формуле 1-32 равна:

а) $L = 4 + 4 + 2 \cdot 2 = 12$ *мгн*;
б) $L = 4 + 4 - 2 \cdot 2 = 4$ *мгн*;
в) при $k = 0$ взаимоиндуктивность $M = 0$ и, следовательно, $L = L_1 + L_2 = 8$ *мгн*.

1-48. Имеется вариометр, у которого индуктивности катушек $L_1 = 225$ *мкгн* и $L_2 = 100$ *мкгн*. Коэффициент связи между катушками $k = 30\%$. Определить максимальную и минимальную индуктивности.

Ответ: 415 и 235 *мкгн*.

1-49. Определить общую индуктивность двух одинаковых включенных навстречу друг другу катушек, если коэффициент связи $k = 100\%$.

Ответ: Нуль.

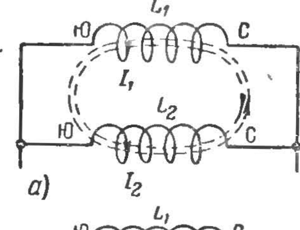
1-50. Имеются две катушки, которые при включении их последовательно друг с другом показали результирующую индуктивность 500 *мкгн*. При перемене концов соединения этих катушек друг с другом результирующая индуктивность оказалась равной 100 *мкгн*. Определить взаимоиндуктивность между катушками.

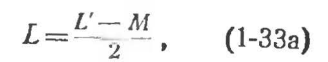
Ответ: 100 *мкгн*.

При параллельном включении двух индуктивностей и при наличии между ними связи (фиг. 1-22) результирующая индуктивность определяется по формуле

$$L = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 + 2M}, \qquad (1\text{-}33)$$

где в знаменателе знак (+) относится к случаю фиг. 1-22,*а*, когда направления токов в витках катушек совпадают, а знак (—) соответствует случаю фиг. 1-22,*б*, когда направления токов в витках противоположны. В частном случае, когда $L_1 = L_2 = L'$, формула (1-33) может быть представлена в виде





$$L = \frac{L' - M}{2}, \qquad (1\text{-}33а)$$

если направления токов в витках обеих катушек одинаковы, и

$$L = \frac{L' + M}{2}, \qquad (1\text{-}33б)$$

если направления токов в витках противоположны.

Фиг. 1-22.

Задачи.

1-51. Две катушки с индуктивностями 10 *мгн* каждая включены параллельно. Определить результирующую индуктивность в случаях, когда:

а) направления токов в витках катушек совпадают;

б) направления токов противоположны.

Коэффициент связи между катушками в обоих случаях равен 20%.

Ответ: а) 4 *мгн*; б) 6 *мгн*.

1-52. Даны две катушки индуктивностью L каждая (две половинки первичной обмотки трансформатора). Коэффициент связи между ними $k = 1$. Определить результирующую индуктивность в следующих случаях:

а) катушки включены последовательно и направления токов в витках обеих катушек совпадают;

б) катушки включены последовательно, но направления токов в витках противоположны;

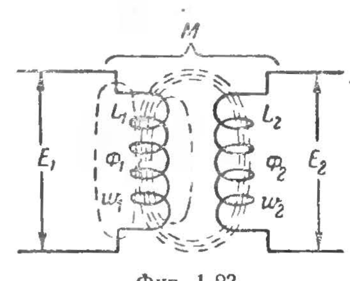
в) катушки включены параллельно и направления токов в витках совпадают;

г) катушки включены параллельно, но направления токов в витках противоположны.

Ответ: а) $4L$; б) нуль; в) нуль; г) L.

Трансформаторное включение катушек индуктивности. Электродвижущая сила, индуктируемая во вторичной цепи (фиг. 1-23) при изменении тока в первичной цепи, определяется соотношением

$$E_2 = \frac{w_2 k \Phi}{t} \cdot 10^{-8}\ в, \qquad (1\text{-}34)$$



Фиг. 1-23.

где E_2 — индуктируемая э. д. с. во вторичной цепи, *в*;
w_2 — число витков вторичной цепи;
Φ — полный магнитный поток в первичной катушке, *мкс*;
t — время, в течение которого происходит изменение потока, сек.;
k — коэффициент связи между катушками.

Примеры и задачи.

1-53. Две катушки расположены так, что только 40% числа магнитных силовых линий первой катушки пересекает витки второй катушки, число витков которой равно 350.

Какая э. д. с. будет индуктироваться во вторичной катушке, если магнитный поток в 600 000 *мкс* спадает до нуля в течение 0,1 сек.?

Решение

$$E_2 = \frac{w_2 k \Phi}{t} \cdot 10^{-8} = \frac{350 \cdot 0{,}4 \cdot 600\,000}{0{,}1} \cdot 10^{-8} = 8{,}4\ в.$$

1-54. Две катушки с числами витков $w_1 = 50$ и $w_2 = 100$ расположены так, что только 5% линий магнитного поля первой катушки пересекают витки второй катушки. При токе в 5 *ма* в первой катушке создается магнитный поток в 800 *мкс*. а) Определить, какая э. д. с. будет индуктироваться во второй катушке, если ток уменьшается от максимального значения до нуля

в течение 0,00005 сек.? б) Найти отношение э. д. с. в первичной и вторичной цепях; в) Найти общее выражение для коэффициента трансформации n, т. е. $n = E_2/E_1$.

Ответ: а) $E_2 = 0{,}8$ *в*; б) $E_1 = 8$ *в*; $\frac{E_2}{E_1} = 0{,}1$; в) $n = k\frac{w_2}{w_1}$.

3. ЕМКОСТЬ В ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Совокупность двух проводников (обкладок), разделенных диэлектриком, называется **конденсатором**. Если разность потенциалов на обкладках конденсатора равна U, а заряд на одной из обкладок равен q, то **емкость конденсатора** может быть определена, как

$$C = \frac{q}{U}. \qquad (1\text{-}35)$$

Если q выражено в кулонах (ампер-секундах), а U — в вольтах, то емкость C выражается в фарадах (*ф*).

Энергия, запасенная в электрическом поле конденсатора, определяется формулой

$$W = \frac{CU^2}{2}, \qquad (1\text{-}36)$$

где W — энергия, *вт-сек*;
C — емкость, *ф*;
U — напряжение, *в*.

Емкость конденсатора с плоско-параллельными пластинами. В простейшем случае конденсатора **из двух пластин** емкость определяется формулой

$$C = \frac{0{,}0885\,\varepsilon S}{d}, \qquad (1\text{-}37)$$

где C — емкость, *мкмкф*;
S — площадь одной пластины, *см*²;
d — расстояние между пластинами или толщина диэлектрика, *см*;
ε — диэлектрическая проницаемость материала диэлектрика.

Значения ε для некоторых наиболее употребительных диэлектриков приведены в табл. 1-2.

Таблица 1-2

Диэлектрическая проницаемость некоторых диэлектриков

Диэлектрик	ε
Воздух	1,0
Казеин	6,4
Кварц	4,2
Миканит	4,5—6,0
Радиофарфор	6—6,5
Слюда	5—7
Стеатит	5—6
Стекло обыкновенное	5,5—6,5
Тиконд	60—90
Шеллак	2,5—4
Целлулоид	5,5—8,5
Эбонит	2,5—4
Бумага парафинированная	2,2

Емкость **многопластинчатых** конденсаторов, состоящих из N пластин, определяется формулой

$$C = \frac{0{,}0885\,\varepsilon S(N-1)}{d}\ \text{мкмкф}. \qquad (1\text{-}38)$$

Примеры и задачи.

1-55. Определить емкость конденсатора с воздушным диэлектриком, состоящего из двух квадратных пластин со стороной 10 *см*, отстоящих друг от друга на расстоянии 0,1 *мм*.

Ответ: 885 *мкмкф*.

1-56. Если в конденсаторе предыдущей задачи воздух заменить слюдой ($\varepsilon = 8$), то чему будет равна его емкость?

Ответ: 7 080 *мкмкф*.

1-57. Конденсатор состоит из 10 пластин размером 4×5 *см*; диэлектриком служит слюда с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 6$ и толщиной 0,1 *см*. Определить емкость конденсатора.

Решение

$$C = \frac{0{,}0885\,\varepsilon S(N-1)}{d} = \frac{0{,}0885 \cdot 6 \cdot 4 \cdot 5\,(10-1)}{0{,}1} = 955\ \text{мкмкф}.$$

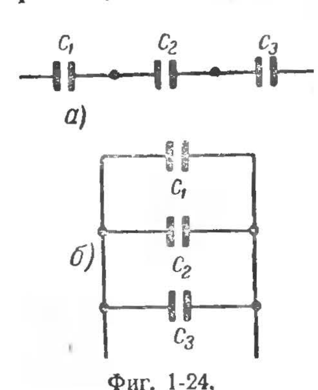
1-58. Емкость конденсатора равна 0,001217 *мкф*. Диэлектрик — слюда ($\varepsilon = 5{,}5$). Конденсатор состоит из двух пластин площадью 100 $см^2$ каждая. Определить толщину диэлектрика.

Ответ: $d = 0{,}04$ *см*.

1-59. Имеется девять пластин площадью 3×5 *см*. Диэлектриком служит слюда ($\varepsilon = 6{,}3$). Собранный из этих материалов конденсатор показал емкость 0,00223 *мкф*. Чему равна толщина слюды?

Ответ: $d = 0{,}03$ *см*.

1-60. Конденсатор состоит из двух длинных полосок фольги; длина каждой полоски 150 *см* и ширина 2 *см*. Диэлектриком служит парафинированная бумага с $\varepsilon = 2{,}2$ и толщиной 0,3 *мм*. Определить емкость конденсатора.



Фиг. 1-24.

Ответ: $C = 1\,947$ *мкмкф*.

1-61. Сколько нужно квадратных пластин со стороной 5 *см* для получения емкости в 3 720 *мкмкф*, если диэлектриком служит слюда с $\varepsilon = 6{,}0$ и толщиной 0,25 *мм*?

Ответ: Восемь пластин.

1-62. Имеются два конденсатора одинаковой конструкции. Площадь пластинки одного из них $S_1 = 150$ $см^2$, другого — $S_2 = 130$ $см^2$. Емкость первого конденсатора $C_1 = 0{,}02$ *мкф*. Чему равна емкость C_2 другого конденсатора?

Ответ: $C_2 = 0{,}00173$ *мкф*.

Последовательное и параллельное включения емкостей. При последовательном включении емкостей C_1, C_2, C_3 и т. д. (фиг. 1-24,*а*) результирующая емкость C равна:

$$C = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \ldots}. \qquad (1\text{-}39)$$

В случае двух последовательно включенных емкостей результирующая емкость равна

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}.$$

При параллельном включении емкостей (фиг. 1-24,*б*) результирующая емкость равна

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \ldots \qquad (1\text{-}39а)$$

Результирующая емкость при смешанном включении емкостей определяется формулами (1-39) и (1-39а).

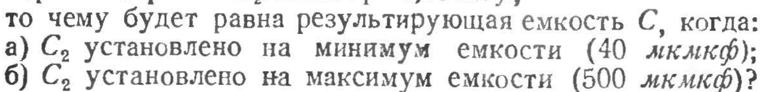
Примеры и задачи.

1-63. Два конденсатора емкостью 4 и 8 *мкф* включены: а) последовательно и б) параллельно друг другу. Найти результирующую емкость в обоих случаях.

Ответ: а) 2,66 *мкф*; б) 12 *мкф*.

Фиг. 1-25.

1-64. Конденсатор C_1 (фиг. 1-25) включен последовательно с конденсатором настройки C_2. Если $C_1 = 0{,}05$ *мкф*, то чему будет равна результирующая емкость C, когда: а) C_2 установлено на минимум емкости (40 *мкмкф*); б) C_2 установлено на максимум емкости (500 *мкмкф*)?



Ответ: а) практически $C = C_2 = 40$ *мкмкф*; б) $C = 495$ *мкмкф*.

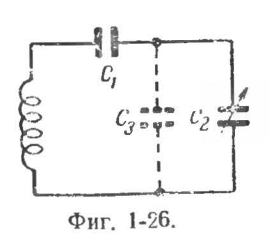
1-65. Если в предыдущей задаче емкость $C_1 = 0{,}005$ *мкф*, то чему будет равна результирующая емкость C при установке C_2 на его максимальную емкость?

Ответ: $C = 454{,}5$ *мкмкф*.

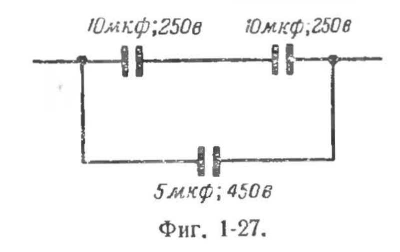
1-66. В контуре гетеродина приемника конденсатор сопряжения C_1 (фиг. 1-26) имеет следующие значения: для коротких волн — 0,0036 *мкф*; для средних волн — 0,0006 *мкф*; для длинных волн — 0,0003 *мкф*. Максимальная емкость конденсатора настройки C_2 равна 500 *мкмкф*. Чему будет равна результирующая емкость контура

в каждом диапазоне волн, если емкость монтажа C_3 равна 50 *мкмкф*?

Решение. Емкость C_3 включена параллельно емкости C_2,



Фиг. 1-26.



Фиг. 1-27.

поэтому общая емкость их $C' = C_3 + C_2 = 500 + 50 = 550$ *мкмкф*. Тогда получаем:

а) для коротких волн

$$C = \frac{C_1 C'}{C_1 + C'} = \frac{0{,}0036 \cdot 0{,}00055}{0{,}0036 + 0{,}00055} = 0{,}000477 \text{ мкф} = 477 \text{ мкмкф};$$

б) для средних волн

$$C = \frac{0{,}0006 \cdot 0{,}00055}{0{,}0006 + 0{,}00055} =$$

$$= 0{,}000287 \text{ мкф} = 287 \text{ мкмкф};$$

в) для длинных волн

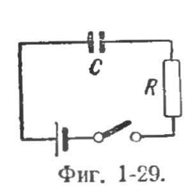
$$C = 191 \text{ мкмкф}.$$

Фиг. 1-28.

1-67. Определить результирующую емкость для случая фиг. 1-27.

Ответ: 10 *мкф*.

1-68. В трехэлектродной лампе межэлектродные емкости (фиг. 1-28) равны: C_1, C_2 и C_3. Найти полную емкость между катодом и анодом;



Фиг. 1-29.

Решение. Между анодом и катодом включены емкости: C_3 и параллельно к ней две емкости C_2 и C_1, включенные между собой последовательно. Поэтому результирующая емкость между катодом и анодом равна

$$C = C_3 + \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}.$$

Постоянная времени цепи с конденсатором. Время, в течение которого напряжение на конденсаторе в цепи

фиг. 1-29 достигнет при его заряде 63% своего конечного максимального значения, равного э. д. с. источника, называется постоянной времени цепи и выражается как

$$\tau = CR, \qquad (1\text{-}40)$$

где τ — время в секундах, в течение которого емкость зарядится до 63% от своего конечного максимального заряда;

C — емкость, *ф*;

R — сопротивление цепи, *ом*.

Постоянная времени показывает также, через какое время при разряде конденсатора напряжение на нем падает до 37% от своего первоначального значения.

Время, необходимое для того, чтобы напряжение (или заряд) на конденсаторе достигло определенного значения в процентах от его максимального значения, определяется по формуле

$$t = k\tau = kRC, \qquad (1\text{-}40а)$$

где значения k берутся из кривых фиг. 1-20.

Примеры и задачи.

1-69. Емкость 0,005 *мкф* и сопротивление 2 *мгом* включены последовательно, и эта цепь подключена к батарее с напряжением 300 *в*. а) Чему равна постоянная времени этой цепи? б) Какое время необходимо, чтобы конденсатор зарядился до 200 *в*? До 300 *в*? в) Если конденсатор зарядится полностью (до 300 *в*), то через какое время он разрядится до 200 *в*? До 50 *в*?

Решение

а) Постоянная времени $\tau = RC = 2 \cdot 10^6 \cdot 0{,}005 \cdot 10^{-6} = 0{,}01$ сек.

б) Так как 200 *в* составляет $\frac{200}{300} \cdot 100 = 66{,}6\%$, то из кривой заряда на графике (фиг. 1-20) находим, что $k = 1{,}1$. Следовательно,

$$t = kRC = 1{,}1 \cdot 0{,}01 = 0{,}011 \text{ сек.}$$

Конденсатор зарядится до полного напряжения практически за время

$$t = k\tau = 5 \cdot 0{,}01 = 0{,}05 \text{ сек.}$$

в) Конденсатор разрядится до 200 *в* за время

$$t = k\tau = 0{,}4 \cdot 0{,}01 = 0{,}004 \text{ сек.}$$

Конденсатор разрядится до 50 *в* за время

$$t = k\tau = 1{,}8 \cdot 0{,}01 = 0{,}018 \text{ сек.}$$

1-70. В цепь сетки детекторной лампы включен конденсатор емкостью 250 *мкмкф*, шунтированный сопротивлением в 1 *мгом*.

1) Чему равна постоянная времени этой цепи? б) За какое время конденсатор полностью разрядится?

Ответ: а) 0,00025 сек; б) 0,00125 сек.

1-71. В цепь схемы автоматического регулирования громкости приемника включена цепь RC с постоянной времени $\tau = 0,2$ *сек*. а) Чему равно сопротивление этой цепи, если емкость равна 0,1 *мкф*? б) Чему должна быть равна емкость, если сопротивление равно 1 *мгом*?

Ответ: а) 2 *мгом*; б) 0,2 *мкф*.

Емкость проводов. Емкость одиночного параллельного земле проводника определяется формулой

$$C = \frac{24,2}{\lg \frac{4h}{d}} \text{ мкмкф/м}, \qquad (1\text{-}41)$$

где h — высота подвеса над землей;
d — диаметр провода.

Размеры выражены в одинаковых единицах.

Емкость двухпроводной линии определяется формулой

$$C = \frac{12,1}{\lg \frac{2D}{d}} \text{ мкмкф/м}, \qquad (1\text{-}42)$$

где D — расстояние между проводами;
d — диаметр проводов.

Размеры выражены в одинаковых единицах.

Емкость концентрического кабеля определяется формулой

$$C = \frac{24,2\varepsilon}{\lg \frac{D}{d}} \text{ мкмкф/м}, \qquad (1\text{-}43)$$

где d — внешний радиус внутреннего проводника;
D — внутренний радиус внешнего проводника;
ε — диэлектрическая проницаемость диэлектрика, заполняющего кабель.

Размеры выражены в одинаковых единицах.

Задачи.

1-72. Определить емкость проводника задачи 1-28.

Ответ: 135 *мкмкф*.

1-73. Определить емкость двухпроводной линии задачи 1-29.

Ответ: 67,5 *мкмкф*.

1-74. Определить емкость концентрического кабеля задачи 1-30, если кабель заполнен полистиролом ($\varepsilon = 2,5$).

Ответ: 46,5 *мкмкф*.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

Период T и частота f синусоидального переменного тока связаны соотношением

$$T = \frac{1}{f} \text{ сек.}; \quad f = \frac{1}{T} \text{ гц}. \qquad (2\text{-}1)$$

Угловая или круговая частота ω равна

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \, \frac{1}{\text{сек.}}. \qquad (2\text{-}2)$$

Мгновенное значение i переменного тока или напряжения u определяется соответственно

$$\begin{aligned} i &= I_a \sin \omega t = I_a \sin 2\pi f t = I_a \sin \alpha; \\ u &= U_a \sin \omega t = U_a \sin 2\pi f t = U_a \sin \alpha, \end{aligned} \qquad (2\text{-}3)$$

где I_a — амплитуда тока;
U_a — амплитуда напряжения;
t — время, сек.;
$\alpha = \omega t = 2\pi f t$ — фазовый угол или фаза в радианах.

Действующее или эффективное, или среднеквадратичное значение тока I или напряжения U соответственно равны

$$I = \frac{I_a}{\sqrt{2}} = 0,707 I_a; \qquad (2\text{-}4)$$

$$U = \frac{U_a}{\sqrt{2}} = 0,707 U_a.$$

Среднее значение I_0 переменного тока за полпериода равно

$$I_0 = \frac{2}{\pi} I_a = 0{,}637 I_a. \qquad (2\text{-}5)$$

Среднее значение переменного тока за период равно нулю.

Задачи и примеры.

2-1. Частота тока $f = 50$ *гц*. Чему равен период T?
Ответ: $T = 0{,}02$ сек.

2-2. Период тока равен $T = 10$ *мксек*. Чему равна частота?

Ответ: $f = 100$ *кгц*.

2-3. Частота тока $f = 5\,000$ *гц*. Успеет ли за один период этого тока полностью разрядиться конденсатор в задаче 1-71?

Ответ: Нет.

2-4. Амплитуда переменного тока $I_a = 5$ *а*, частота $f = 50$ *гц*. Чему равно мгновенное значение тока через 0,005 сек. после прохождения его через нуль?

Решение. Мгновенное значение тока равно

$$i = I_a \sin \omega t = I_a \sin 2\pi f t.$$

Подставляя соответствующие значения, получим

$$i = 5 \sin (2\pi \cdot 50 \cdot 0{,}005 \cdot 57{,}3)^{*} = 5 \sin 90°.$$

Так как $\sin 90° = 1$, то $i = 5 = I_a$, т. е. в этот момент мгновенное значение тока равно его амплитуде.

2-5. Найти мгновенное значение тока в предыдущей задаче при $t = \frac{1}{125}$ *сек*.

Ответ: $i = 2{,}94$ *а*.

2-6. Амплитуда тока с частотой $f = 4 \cdot 10^6$ *гц* равна $I_a = 20$ *а*. Через какое время после прохождения через нуль ток достигнет значения 12 *а*?

* Множитель 57,3 вводится, чтобы под знаком синуса получить выражение угла в градусах (1 радиан $= 57{,}3°$).

Решение.

$$12 = 20 \sin (2\pi f t) = 20 \sin (2\pi \cdot 4 \cdot 10^6 t \cdot 57{,}3) = 20 \sin (144 \cdot 10^7 t).$$

Следовательно,

$$\sin (144 \cdot 10^7 t) = \sin \alpha = \frac{12}{20} = 0{,}6.$$

Это соответствует по таблицам (см. приложение 2) углу 36°52′. Поэтому

$$144 \cdot 10^7 t = 36 \frac{52°}{60} = \frac{553°}{15},$$

откуда

$$t = \frac{553}{15 \cdot 144 \cdot 10^7} = 256 \cdot 10^{-10} \text{ сек.}$$

2-7. Частота тока $f = 10^6$ *гц*. Через какое время после прохождения через максимальное значение ток достигнет нулевого значения?

Ответ: Через 0,25 *мксек*.

2-8. Измеренное прибором эффективное значение напряжения равно 100 *в*. Чему равна амплитуда напряжения?

Ответ: 141 *в*.

1. АКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Поверхностный эффект. Вследствие поверхностного эффекта величина данного сопротивления возрастает по сравнению с его значением при постоянном токе, так как переменный ток проходит не через всю площадь сечения проводника, а распределяется ближе к его поверхности.

Глубина погружения тока в проводник или глубина поверхностного эффекта определяется формулой

$$d = 50{,}33 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}, \qquad (2\text{-}6)$$

где d — глубина поверхностного эффекта, *см*;
ρ — удельное сопротивление материала;
μ — магнитная проницаемость материала;
f — частота, *гц*.

В случае медных проводников

$$d = \frac{6{,}62}{\sqrt{f}}. \qquad (2\text{-}7)$$

Величина сопротивления в случае переменного тока определяется формулой

$$R_f = \frac{198 \cdot 10^{-6}\sqrt{\rho\mu f}}{P}, \qquad (2\text{-}8)$$

где R_f — сопротивление проводника на 1 *м* длины, *ом*;
ρ, μ, f — как и в случае формулы (2-6);
P — периметр сечения материала, из которого сделано сопротивление, *см*.

В случае медных проводников

$$R_f = \frac{261 \cdot 10^{-7}\sqrt{f}}{P}\ ом/м. \qquad (2\text{-}9)$$

Задачи и примеры.

2-9. Ток с частотой 10^6 *гц* проходит по медному проводнику с площадью сечения 3,14 *мм*². Найти глубину погружения тока в провод и его сопротивление, если длина провода равна 10 *м*.

Решение. Площадь 3,14 *мм*² соответствует диаметру $D = 2$ *мм*. Периметр провода $P = \pi D = 6{,}28$ *мм* $= 0{,}628$ *см*. Следовательно, сопротивление его

$$R_f = \frac{261 \cdot 10^{-7} \cdot \sqrt{f} \cdot l}{P} = \frac{261 \cdot 10^{-7}\sqrt{10^6} \cdot 10}{0{,}628} = 0{,}415\ ом.$$

Глубина погружения тока

$$d = \frac{6{,}62}{\sqrt{f}} = \frac{6{,}62}{10^3} = 0{,}00662\ см = 0{,}06\ мм.$$

2-10. Во сколько раз увеличилось сопротивление проводника предыдущей задачи по сравнению с сопротивлением его постоянному току?

Ответ: В 7,4 раза.

2-11. Даны два проводника одинаковой длины и одинакового поперечного сечения, но один проводник — алюминиевый, другой — медный. В каком из них лучше используется площадь поперечного сечения при токе высокой частоты?

Ответ: В алюминиевом.

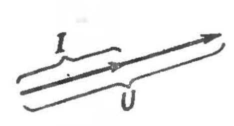
2-12. Какая часть площади сечения будет полезно использована в круглом медном проводнике при частоте тока $f = 100$ *мгц*? Диаметр проводника — 5 *мм*.

Ответ: 0,264%.

Мощность переменного тока. Прохождение переменного тока в цепи, состоящей из активного сопротивления, подчиняется закону Ома, который остается верным для мгновенных, амплитудных и эффективных значений тока и напряжения, т. е.

$$i = \frac{u}{R}; \qquad I_a = \frac{U_a}{R}; \qquad I = \frac{U}{R}. \qquad (2\text{-}10)$$

Переменные ток и напряжение в цепи, содержащей только активное сопротивление R, совпадают по фазе, т. е. сдвиг фазы между током и напряжением равен нулю: ток достигает максимального значения в момент максимального значения напряжения; ток равен нулю в момент прохождения напряжения через нуль. Графически это изображается векторной диаграммой, представленной на фиг. 2-1, где вектор тока $\bar{I}$ совпадает с направлением вектора напряжения $\bar{U}$.



Фиг. 2-1.

Мощность переменного тока, поглощаемая цепью, содержащей только активное сопротивление, определяется формулами:

Мгновенное значение мощности

$$p = iu = i^2R = \frac{u^2}{R}\ вт. \qquad (2\text{-}11)$$

Средняя мощность, т. е. мощность, поглощаемая за период,

$$P = IU = I^2R = \frac{U^2}{R}\ вт \qquad (2\text{-}12)$$

или

$$P = \frac{I_aU_a}{2} = \frac{I_a^2R}{2} = \frac{U_a^2}{2R}\ вт.$$

Мощность, помноженная на время, определяет **расход энергии или работу тока**

$$W = Pt. \qquad (2\text{-}13)$$

Если P выражено в ваттах и t — в секундах, то энергия выражается в ватт-секундах.

Если P выражено в киловаттах и t — в часах, энергия выражается в киловаттчасах.

Поглощаемая сопротивлением мощность выделяется в виде тепла, которое может быть подсчитано по формуле

$$Q = 0{,}24Pt, \qquad (2\text{-}14)$$

где Q — количество выделенного в сопротивлении тепла, *ккал*;

P — мощность, *квт*;

t — время, *сек*.

Задачи и примеры.

2-13. 60-ваттная лампа рассчитана на напряжение 230 *в*. Чему равно ее сопротивление?

Ответ: 881,7 *ом*.

2-14. Сколько потребуется проволоки для изготовления электрического паяльника мощностью 35 *вт* при напряжении сети 120 *в*? Проволока — нихром диаметром 0,1 *мм*.

Ответ: 3,2 *м*.

2-15. Сколько израсходует энергии паяльник предыдущей задачи за время работы в течение 8 час. и сколько будет стоить эта энергия, если 1 *квтч* стоит 40 коп.?

Ответ: 11,2 коп.

2-16. Сопротивление обмотки паяльника равно 252,6 *ом*. Он подключен к сети с амплитудным напряжением в 325,2 *в*. Найти мощность, потребляемую паяльником.

Решение

$$P = \frac{U^2}{R},$$

где U — эффективное значение напряжения.

Поэтому

$$P = \left(\frac{325{,}2}{\sqrt{2}}\right)^2 : 252{,}6 = 208 \text{ вт}.$$

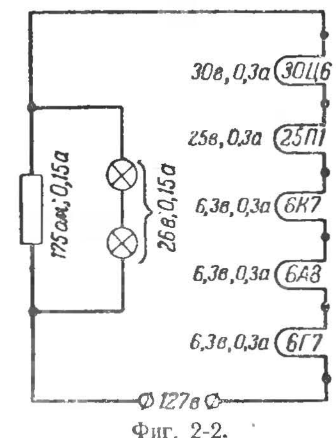
2-17. Дана цепь накала приемника „Рекорд" (фиг. 2-2).

Определить:

а) Какая мощность расходуется в этой цепи?

б) Какое последовательное сопротивление необходимо включить в цепь накала в случае питания приемника от сети с напряжением 220 *в*?

Ответ: а) 38 *вт*; б) 310 *ом*.



Фиг. 2-2.

2-18. На паспорте электроплитки написано: 400 *вт*/120 *в*. Определить амплитуду тока, проходящего через спираль плитки, и стоимость пользования плиткой в течение 10 час. при цене в 40 коп. за 1 *квтч*.

Ответ: 4,7 *а*; 1 руб. 60 коп.

2-19. Прибор в цепи переменного тока показывает значение 5 *а*. Определить среднее значение тока за полпериода и за период.

Ответ: 4,5 *а*; 0.

2-20. Сколько стоит вскипятить электрическим чайником в течение 15 мин. 1 *л* воды, если к. п. д. чайника равен 80% и он рассчитан на включение в сеть с напряжением в 120 *в*?

Решение. Количество тепла, которое необходимо для нагревания 1 *л* (1 000 *см*³) воды от комнатной температуры (16°) до 100°, равно

$$Q = 1\,000(100 - 16) = 84\,000 \text{ кал}.$$

Так как к. п. д. чайника $\eta = 80\%$, то необходимая мощность для кипячения в нем воды

$$P = \frac{Q}{0{,}24 \cdot t \cdot \eta} = \frac{84\,000}{0{,}24 \cdot 15 \cdot 60 \cdot 0{,}8} = 486 \text{ вт} = 0{,}486 \text{ квт}.$$

Следовательно, стоимость кипячения воды равна

$$\frac{0{,}486 \cdot 15 \cdot 40}{60} = 4{,}86 \text{ коп}.$$

2-21. Определить сопротивление нагревательного элемента чайника предыдущей задачи.

Ответ: 29,5 *ом*.

2. ИНДУКТИВНОЕ И АКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Индуктивность в цепи переменного тока. Индуктивность в цепи переменного тока создает э. д. с. самоиндукции, противодействующую приложенному напряжению. Электродвижущая сила самоиндукции равна

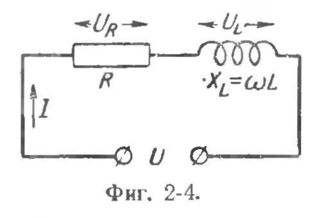
$$E_L = \omega L I, \qquad (2\text{-}15)$$

где $\omega = 2\pi f$ — угловая частота, f — *гц*;

L — индуктивность, *гн*;

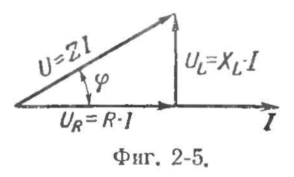
I — ток, *а*.

Произведение ωL представляет сопротивление индуктивности переменному току и называется реактивным индуктивным сопротивлением или, кратко, индуктивным сопротивлением.



Фиг. 2-3.

Векторная диаграмма цепи, содержащей чистую индуктивность, т. е. индуктивность без активного сопротивления (без потерь), показана на фиг. 2-3. Ток в цепи с индуктивностью отстает от приложенного напряжения U на 90° и опережает э. д. с. самоиндукции E_L на 90°. Другими словами, сдвиг фаз между током и напряжением равен 90° (положительный сдвиг фаз), сдвиг фаз между током и э. д. с. самоиндукции равен 90° (отрицательный сдвиг фаз). Сдвиг фаз между U и E_L равен 180° и они друг друга уравновешивают.



Фиг. 2-4.

Фиг. 2-5.

Последовательное включение активного и индуктивного сопротивлений. Если цепь содержит последовательно включенные индуктивность L и активное сопротивление R (фиг. 2-4), то векторная диаграмма такой цепи имеет вид, показанный на фиг. 2-5. В этом случае сдвиг фаз φ между U и I меньше 90° и определяется соотношениями:

$$\cos\varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} = \frac{R}{Z} \qquad (2\text{-}16)$$

или

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{X_L}{R}, \qquad (2\text{-}17)$$

где $X_L = \omega L$ *ом*.

При этом $\cos\varphi$ называется **коэффициентом мощности**. Величина

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \qquad (2\text{-}18)$$

— полное сопротивление цепи — определяется гипотенузой прямоугольного треугольника, построенного на катетах X_L и R.

Приложенное к цепи (фиг. 2-4) напряжение состоит из двух слагающих:

а) падения напряжения на активном сопротивлении: $U_R = IR$;

б) падения напряжения на индуктивном сопротивлении, уравновешивающего э. д. с. самоиндукции: $U_L = IX_L$.

Полное напряжение U представляет геометрическую сумму U_R и U_L, что и показано на фиг. 2-5: U равно гипотенузе прямоугольного треугольника с катетами U_L и U_R.

Мощность переменного тока в цепи, содержащей последовательно включенные индуктивное и активное сопротивления, равна

$$P = UI\cos\varphi = I^2 R = \frac{U_R^2}{R} \text{ вт}. \qquad (2\text{-}19)$$

Если $R=0$, т. е. цепь состоит только из индуктивности, то $\varphi=90°$, $\cos\varphi=0$ и $P=0$, т. е. индуктивность мощности не поглощает.

Произведение $P_к=UI$ называется **кажущейся мощностью** и выражается в вольтамперах (*ва*).

Если R относится к самой катушке, то в этом случае $\operatorname{tg}\varphi$ называют **добротностью** катушки Q_L, т. е.

$$Q_L=\frac{\omega L}{R}. \qquad (2\text{-}20)$$

У катушек, применяемых в цепях высокой частоты, R бывает намного меньше, чем X_L. Тогда полное сопротивление катушки $Z=\sqrt{R^2+X_L^2}\approx X_L$ и $\cos\varphi$ катушки будет равен

$$\cos\varphi\approx\frac{R}{X_L}=\frac{1}{Q_L}. \qquad (2\text{-}21)$$

Задачи и примеры.

2-22. Приборы, включенные в цепь переменного тока, показывают напряжение $U=50$ *в*, ток $I=5$ *а* и мощность $P=100$ *вт*. Чему равен коэффициент мощности цепи?

Ответ: 0,4.

2-23. Ток в цепи равен $I=4$ *а*, напряжение $U=500$ *в* и коэффициент мощности $\cos\varphi=0{,}86$. Какая мощность поглощается в цепи? Чему равна кажущаяся мощность этой цепи?

Ответ: 1 720 *вт*; 2 000 *ва*.

2-24. Поглощаемая в цепи мощность переменного тока равна 475 *вт*. Кажущаяся мощность равна 560 *ва*. Чему равен сдвиг фаз между током и напряжением?

Ответ: 32°.

2-25. Подставьте в уравнение (2-15) выражение индуктивности из формулы (1-21) и определите, чему равно эффективное значение э. д. с. катушки индуктивности.

Ответ: $E=4{,}44\cdot f\cdot w\cdot \Phi\cdot 10^{-8}$ *в*.

2-26. Измеренное напряжение на первичной обмотке трансформатора при частоте 1 000 *гц* равно 2 *в*. Известно, что число витков этой обмотки $w_1=5\,000$. Чему равен максимальный магнитный поток в обмотке?

Ответ: ~ 9 *мкс*.

2-27. Индуктивность дросселя фильтра равна 30 *гн* и его активное сопротивление — 400 *ом*. Определить: а) реактивное сопротивление дросселя при $f=100$ *гц*; б) его полное сопротивление при этой же частоте; в) какой переменный ток будет проходить через дроссель, если приложенное к нему напряжение равно 250 *в*; г) сдвиг фаз между током и напряжением; д) поглощаемую им мощность.

Решение

а) $X_L=2\cdot\pi\cdot f\cdot L=2\cdot\pi\cdot 100\cdot 30=18\,800$ *ом*;

б) $Z=\sqrt{R^2+X_L^2}=\sqrt{400^2+18\,800^2}=18\,900$ *ом*;

в) $I=\frac{U}{Z}=\frac{250}{18\,900}=0{,}0132$ *а* $=13{,}2$ *ма*;

г) $\cos\varphi=\frac{R}{Z}=\frac{400}{18\,900}=0{,}0211$;

$$\varphi=87°50';$$

д) $P=UI\cos\varphi=250\cdot 0{,}0132\cdot 0{,}0211=0{,}07$ *вт*.

2-28. Индуктивность катушки равна 250 *мкгн* и ее активное сопротивление равно 10 *ом*. Определить коэффициент мощности этой катушки при частоте 10^6 *гц*. Чему равна добротность этой катушки?

Ответ: $\cos\varphi\approx 0{,}00636$;

$$Q=157\approx\frac{1}{\cos\varphi}.$$

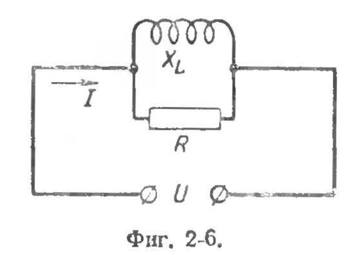
2-29. Катушка с индуктивностью 10 *гн* подключена к сети с напряжением 110 *в* и частотой 50 *гц*. Активное сопротивление катушки равно 220 *ом*. Определить: а) какой ток идет через катушку; б) какую мощность она поглощает; в) коэффициент мощности; г) сдвиг фаз. Начертите векторную диаграмму этой цепи.

Ответ: а) ~0,035 *а*;
б) 0,245 *вт*;
в) 0,0637;
г) $\varphi = 86°20$.

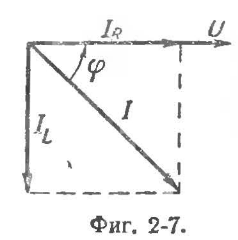
2-30. Катушка индуктивности в 10 *гн* включена последовательно с активным сопротивлением 100 000 *ом* в цепь переменного тока с частотой $f = 5\,000$ *гц*. В какой пропорции распределится между ними подведенное к этой цепи напряжение?

Ответ: $U_L : U_R = 3{,}14$.

2-31. Катушка настройки приемника имеет индуктивность 170 *мкгн* и активное сопротивление — 6,5 *ом*.



Фиг. 2-6.



Фиг. 2-7.

Чему будут равны ее реактивное сопротивление и добротность при частоте 1,21 *мггц*?

Ответ: $X_L = 1\,290$ *ом*; $Q \approx 200$.

2-32. Индуктивность дросселя фильтра в радиоприемнике равна 20 *гн* и активное сопротивление его равно 350 *ом*. Чему равно его полное сопротивление для пульсаций с частотой 100 *гц*?

Ответ: $Z \approx 12\,600$ *ом*.

2-33. При какой частоте катушка индуктивности в 3 *гн*, включенная последовательно с активным сопротивлением в 1 000 *ом*, дает полное сопротивление цепи в 1 520 *ом*?

Решение

$$Z^2 = R^2 + X_L^2,$$

откуда

$$X_L^2 = Z^2 - R^2$$

или

$$(2\pi)^2 f^2 L^2 = Z^2 - R^2,$$

откуда

$$f = \sqrt{\frac{Z^2 - R^2}{(2\pi)^2 L^2}} = \sqrt{\frac{1\,520^2 - 1\,000^2}{(6{,}28)^2 \cdot 3^2}} = \sqrt{3\,600} = 60 \text{ гц}.$$

Параллельное включение индуктивного и активного сопротивлений. При параллельном включении индуктивного и активного сопротивлений в цепь переменного тока (фиг. 2-6) векторная диаграмма имеет вид, показанный на фиг. 2-7. Ток в общей цепи равен геометрической сумме токов в индуктивном и активном сопротивлениях, т. е. равен гипотенузе прямоугольного треугольника, построенного на катетах I_L и I_R:

$$I = \sqrt{I_L^2 + I_R^2}. \qquad (2\text{-}22)$$

Угол φ сдвига фаз между общим током I и приложенным к цепи напряжением U определяется из соотношений

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{R}{X_L} \qquad (2\text{-}22а)$$

или

$$\cos \varphi = \frac{X_L}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}. \qquad (2\text{-}22б)$$

Полная проводимость цепи y будет равна геометрической сумме проводимостей ветвей, т. е. равна гипотенузе прямоугольного треугольника, построенного на катетах $g = \frac{1}{R}$ и $b = \frac{1}{X_L}$:

$$y = \sqrt{g^2 + b^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{X_L}\right)^2} = \frac{\sqrt{X_L^2 + R^2}}{RX_L} \ \frac{1}{ом}, \qquad (2\text{-}23)$$

откуда общее сопротивление всей цепи равно

$$Z = \frac{RX_L}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} \text{ ом}. \qquad (2\text{-}24)$$

Общий ток I в параллельной цепи равен

$$I = \frac{U}{Z}. \qquad (2\text{-}25)$$

Ток в каждой ветви равен

$$I_L = \frac{U}{X_L} = I \sin \varphi; \qquad (2\text{-}26)$$

$$I_R = \frac{U}{R} = I \cos \varphi. \qquad (2\text{-}27)$$

Мощность, поглощаемая в цепи, равна

$$P = UI \cos \varphi = I_R^2 R = \frac{U^2}{R}. \qquad (2\text{-}28)$$

Примеры и задачи.

2-34. Индуктивность катушки возбуждения громкоговорителя (фиг. 1-15) равна 25 *гн*, сопротивление $R_1 = 10\,000$ *ом* и $R_2 = 140\,000$ *ом*. Частота пульсаций тока $f = 100$ *гц* и коэффициент пульсаций, т. е. отношение амплитуды переменной составляющей напряжения к постоянной составляющей напряжения, $\alpha = 20\%$. Постоянная составляющая напряжения равна 250 *в*. Определить: а) значения переменных токов в активной и реактивной ветвях; б) общий переменный ток в неразветвленной цепи; в) сдвиг фаз между переменными током и напряжением; г) полное сопротивление Z данной цепи для переменного тока; д) мощность переменного тока в обеих ветвях. Активное сопротивление катушки $R_L = 300$ *ом*.

Решение

а) $\omega L = 2\pi f L = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 100 \cdot 25 = 15\,700$ *ом*.

Полное сопротивление реактивной ветви

$$Z_L = \sqrt{R_L^2 + X_L^2} = \sqrt{300^2 + 15\,700^2} \approx 15\,700 = X_L,$$

т. е. практически определяется только реактивным сопротивлением катушки индуктивности на данной частоте. Так как коэффициент пульсаций $\alpha = \frac{U_a}{U_0}$, где U_0—постоянная составляющая напряжения, то U_a — амплитуда переменной составляющей выпрямленного напряжения — равна $U_a = 0{,}2 \cdot 250 = 50$ *в*. Тогда амплитуда тока в ветви с индуктивностью равна

$$I_{aL} = \frac{U_a}{X_L} = \frac{50}{15\,700} = 0{,}0032 \ a = 3{,}2 \ ма.$$

Амплитуда тока в активной ветви равна

$$I_{aR} = \frac{U_a}{R_1 + R_2} = \frac{50}{150\,000} = 0{,}00033 \ a = 0{,}33 \ ма;$$

б) Общий ток в неразветвленной цепи равен

$$I_a = \sqrt{I_{aR}^2 + I_{aL}^2} = \sqrt{0{,}33^2 + 3{,}2^2} = 3{,}24 \ ма;$$

в) Угол сдвига фаз между U и I_a определим из соотношения

$$I_{aL} = I_a \sin \varphi,$$

откуда

$$\sin \varphi = \frac{I_{aL}}{I_a} = \frac{3{,}2}{3{,}24} = 0{,}99, \text{ т. е. } \varphi \approx 89{,}5°;$$

г) Результирующее сопротивление

$$Z = \frac{U_a}{I_a} = \frac{50}{3{,}24 \cdot 10^{-3}} = 15\,400 \ ом;$$

д) Мощность переменной составляющей, поглощаемая в параллельной цепи, равна

$$P = \frac{U_a I_a}{2} \cos \varphi = \frac{50 \cdot 3{,}24 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot \cos 89{,}5° \approx 0{,}007 \ вт,$$

т. е. практически равна нулю.

2-35. Индуктивность первичной обмотки трансформатора равна 20 *гн*. а) Какой величины сопротивлением надо ее шунтировать, чтобы результирующие сопротивления этой параллельной цепи при частотах 100 и 4000 *гц* отличались друг от друга не более, чем на 1,0%? б) Определить, насколько результирующее сопротивление на этих частотах будет отличаться от результирующего сопротивления при 1 000 *гц*. в) Решите п. а) для условия, чтобы результирующие сопротивления отличались друг от друга не больше, чем на 10%. г) Для шунтирующего сопротивления, найденного из условия *в*) решите задание *б*). Сравните между собой полученные из обоих условий результаты и сделайте из них соответствующие выводы.

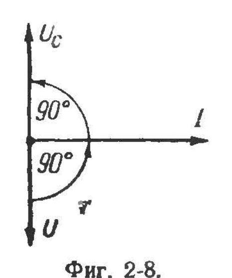
Ответ: а) $R \approx 120\,000$ *ом*;

б) на 19,5% и на 27%;

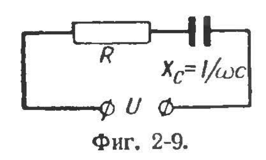
в) $R \approx 5\,750$ *ом*.

3. ЕМКОСТЬ И АКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Цепь, содержащая только емкость. В цепи, содержащей только емкость, ток опережает приложенное к цепи напряжение на 90° и отстает от напряжения на конденсаторе на 90°, т. е. сдвиг фаз между током и приложенным напряжением равен 90° (отрицательный сдвиг фаз); сдвиг фаз между напряжением на конденсаторе и током равен 90° (положительный сдвиг фаз). Сдвиг фаз между приложенным напряжением U и напряжением на конденсаторе U_C равен 180°, и эти напряжения друг друга уравновешивают. Векторная диаграмма цепи показана на фиг. 2-8.



Фиг. 2-8.



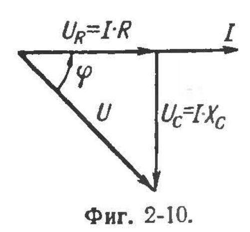
Фиг. 2-9.

Емкость представляет для переменного тока данной частоты сопротивление

$$X_C=\frac{1}{\omega C}\ ом, \qquad (2\text{-}29)$$

где $\omega=2\pi f$ — круговая частота, f — *гц*;
C — емкость, *ф*.

X_C называется реактивным емкостным сопротивлением или, кратко, емкостным сопротивлением.



Фиг. 2-10.

Последовательное включение емкостного и активного сопротивлений. Если цепь содержит последовательно включенные емкость и активное сопротивление (фиг. 2-9), то векторная диаграмма в этом случае принимает вид, показанный на фиг. 2-10, а сдвиг фаз между U и I меньше 90° и определяется формулой

$$\cos\varphi=\frac{R}{\sqrt{R^2+X_C^2}}, \qquad (2\text{-}30)$$

где $\sqrt{R^2+X_C^2}=\sqrt{R^2+\left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}$ — полное сопротивление цепи, определяемое гипотенузой прямоугольного треугольника, построенного на катетах R и X_C или

$$\operatorname{tg}\varphi=\frac{X_C}{R}. \qquad (2\text{-}31)$$

Если R учитывает потери в самом конденсаторе, то $\operatorname{tg}\varphi$ в этом случае называют добротностью Q_C конденсатора, т. е.

$$Q_C=\operatorname{tg}\varphi=\frac{X_C}{R}=\frac{1}{R\omega C}. \qquad (2\text{-}32)$$

Применяемые в цепях высокой частоты конденсаторы имеют R намного меньше, чем X_C. Поэтому можно считать, что

$$Z=\sqrt{R^2+X_C^2}\approx X_C;$$

$$\cos\varphi\approx\frac{R}{X_C}=\frac{1}{Q_C}. \qquad (2\text{-}33)$$

Приложенное к цепи фиг. 2-9 напряжение состоит из двух слагающих:

а) падения напряжения на активном сопротивлении: $U_R=IR$;

б) падения напряжения на емкостном сопротивлении: $U_C=IX_C$.

Полное напряжение U представляет собой геометрическую сумму U_R и U_C, что и показано на фиг. 2-10: U равно гипотенузе прямоугольного треугольника, построенного на катетах U_R и U_C.

Мощность переменного тока в цепи, содержащей последовательно включенные R и C, равна

$$P=UI\cos\varphi=I^2R=\frac{U_R^2}{R}\ вт. \qquad (2\text{-}34)$$

Если $R=0$, т. е. цепь состоит только из емкости, то $\varphi=90°$, $\cos\varphi=0$ и $P=0$, т. е. емкость мощности не поглощает.

Произведение $P_к=UI$ называется кажущейся мощностью и выражается в вольт-амперах (*ва*).

Примеры и задачи.

2-36. Чему равно емкостное сопротивление конденсатора емкостью 0,5 *мкф* при частоте 50 *гц*?

Решение

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{2}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 0{,}5 \cdot 10^{-6}} = 6\,370 \text{ ом.}$$

2-37. Конденсатор сглаживающего фильтра в выпрямителе приемника имеет емкость 10 *мкф*. Частота пульсаций тока $f = 100$ *гц*. Чему равно емкостное сопротивление этого конденсатора: а) на частоте пульсаций, б) на частоте 3 *кгц* напряжения, случайно попавшего в фильтр?

Ответ: а) 159 *ом*; б) 5,31 *ом*.

2-38. Емкость конденсатора в цепи сетки детекторной лампы равна 0,0001 *мкф*. Определить емкостное сопротивление этого конденсатора: а) для несущей частоты 1,4 *мгц*; б) для модулирующей частоты 3,5 *кгц*.

Ответ: а) 1 137 *ом*; б) 455 000 *ом*.

2-39. Емкостное сопротивление сглаживающего конденсатора в цепи фильтра выпрямителя при частоте пульсаций 50 *гц* равно 199 *ом*. Определить его емкость.

Ответ: 16 *мкф*.

2-40. Конденсатор емкостью в 1 *мкф* включен последовательно с активным сопротивлением 50 *ом*. Найти полное сопротивление цепи при частоте 1 500 *гц*.

Решение.

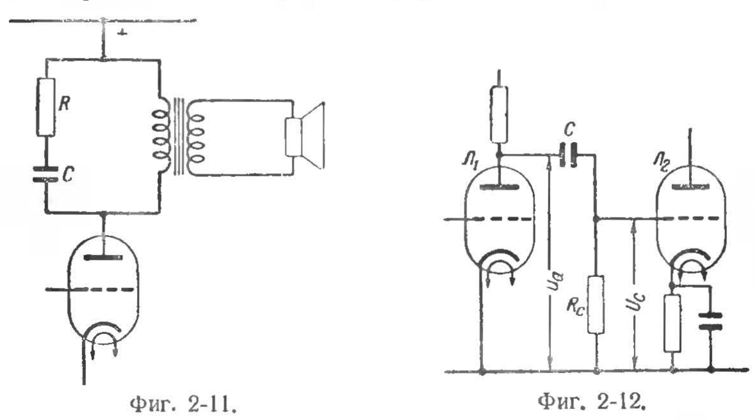
$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{2\pi f C}\right)^2} = \sqrt{50^2 + \left(\frac{1}{6{,}28 \cdot 1\,500 \cdot 1 \cdot 10^{-6}}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{50^2 + \left(\frac{10^6}{9\,420}\right)^2} = \sqrt{2\,500 + 11\,270} = 117{,}3 \text{ ом.}$$

2-41. В тон-корректирующую цепь включены последовательно емкость $C = 0{,}01$ *мкф* и сопротивление $R = 8\,000$ *ом* (фиг. 2-11). Определить полное сопротивление этой цепи при частотах 2; 4; 6 и 8 *кгц* и построить кривую изменения Z в зависимости от f.

Ответ: 11 290; 8 934; 8 428 и 8 244 *ом*.

2-41а. Емкость переходного конденсатора C в усилителе на сопротивлениях (фиг. 2-12) равна 0,01 *мкф*.

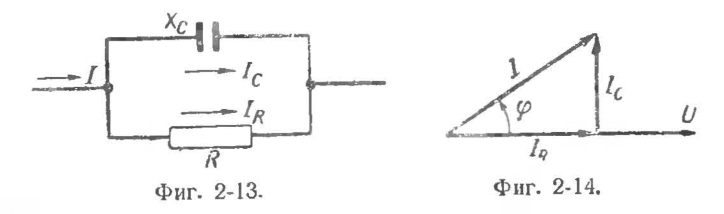


Фиг. 2-11. Фиг. 2-12.

Сопротивление утечки следующей лампы $R_c = 0{,}5$ *мгом*. Определить напряжение U_c на сетке второй лампы при 50 и 250 *гц*, если напряжение $U_a = 12$ *в*.

Ответ: 1) 10,13 *в*; 2) 11,91 *в*.

Параллельное включение емкостного и активного сопротивлений. При параллельном включении емкости и активного сопротивления в цепь переменного тока (фиг. 2-13) векторная диаграмма тока и напряжения имеет вид, показанный на фиг. 2-14. Общий ток в неразветвленной цепи равен геометрической сумме



Фиг. 2-13. Фиг. 2-14.

токов в емкостном и активном сопротивлениях, т. е. равен гипотенузе прямоугольного треугольника, построенного на катетах I_C и I_R:

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_C^2}. \tag{2-35}$$

Угол φ сдвига фаз между общим током I и приложенным к цепи напряжением U равен

$$\operatorname{tg}\varphi=\frac{R}{X_C} \qquad (2\text{-}36)$$

или

$$\cos\varphi=\frac{X_C}{\sqrt{X_C^2+R^2}}. \qquad (2\text{-}37)$$

Для параллельного включения X_C и R можно построить треугольник проводимости.

Полная проводимость цепи y равна гипотенузе прямоугольного треугольника, построенного на катетах $g=\frac{1}{R}$ и $b=\frac{1}{X_C}$;

$$y=\sqrt{g^2+b^2}=\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2+\left(\frac{1}{X_C}\right)^2}=$$

$$=\frac{\sqrt{R^2+X_C^2}}{RX_C}\ \frac{1}{ом}, \qquad (2\text{-}38)$$

откуда общее сопротивление всей цепи для приложенного напряжения

$$Z=\frac{RX_C}{\sqrt{R^2+X_C^2}}\ ом. \qquad (2\text{-}39)$$

Общий ток

$$I=\frac{U}{Z}. \qquad (2\text{-}40)$$

Ток в каждой ветви равен

$$I_c=\frac{U}{X_C}=I\sin\varphi; \qquad (2\text{-}41)$$

$$I_R=\frac{U}{R}=I\cos\varphi. \qquad (2\text{-}42)$$

Мощность, поглощаемая в цепи,

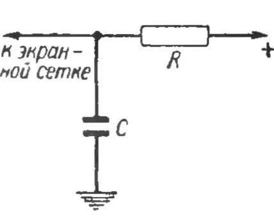
$$P=UI\cos\varphi=I_R^2R=\frac{U^2}{R}. \qquad (2\text{-}43)$$

Примеры и задачи.

2-42. Сопротивление 5 000 *ом* и конденсатор 0,5 *мкф* включены параллельно друг другу. а) Чему равно емкостное сопротивление конденсатора на частоте f=5 000 *гц*? б) В какой ветви проходит бо́льший ток?

Ответ: а) 63,6 *ом*; б) в емкостной ветви.

2-43. В цепи экранирующей сетки (фиг. 2-15) R=7 500 *ом*. Если желательно, чтобы емкостное сопротивление конденсатора C было в 100 раз меньше сопротивления R, то чему должна быть равна емкость C при частоте 1,5 *мггц*?



Фиг. 2-15.

Ответ: 1 420 *мкмкф*.

2-44. Сопротивление 1 000 *ом* и конденсатор в 20 *мкф* включены параллельно друг другу. (фиг. 1-2). а) Чему равно емкостное сопротивление конденсатора при частоте сигнала 100 *гц*? б) Где проходит бо́льший переменный ток: через емкость или сопротивление?

Ответ: а) 79,5 *ом*; б) через емкость.

2-45. Емкость в 16 *мкф* включена параллельно с сопротивлением 600 *ом*. К цепи приложено напряжение 250 *в* с частотой 50 *гц*. Определить: а) токи, проходящие через емкость и сопротивление; б) коэффициент мощности; в) угол сдвига фаз; г) мощность, поглощаемую в цепи.

Решение

а) $I_R=\frac{U}{R}=\frac{250}{600}=0{,}416\ a;$

$$X_C=\frac{1}{2\pi fC}=\frac{1}{6{,}28\cdot 50\cdot 16\cdot 10^{-6}}=199\ ом;$$

$$I_C=\frac{250}{199}=1{,}25\ a;$$

б) $I=\sqrt{I_R^2+I_C^2}=\sqrt{0{,}416^2+1{,}25^2}=1{,}33\ a;$

в) $\cos\varphi=\frac{I_R}{I}=\frac{0{,}416}{1{,}33}=0{,}314;$

г) по таблицам находим $\varphi = 71°42'$;

д) $P = UI \cos\varphi = 250 \cdot 1{,}33 \cdot 0{,}314 = 105$ *вт.*

2-46. К цепи, состоящей из параллельно включенных $C = 3\,000$ *мкмкф* и $R = 50$ *ом*, приложено напряжение $U = 100$ *в* с частотой $f = 10^6$ *гц*. Определить: а) общий ток в неразветвленной цепи; б) токи в ветвях; в) сдвиг фаз между U и I; г) мощность, поглощаемую в цепи.

Ответ: а) $I = 2{,}75$ *а*;

б) $I_R = 2$ *а* и $I_C = 1{,}88$ *а*;

в) $\operatorname{tg}\varphi = 0{,}94$; $\varphi = 43°20'$;

г) $P = 200$ *вт.*

4. АКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ, ИНДУКТИВНОСТЬ И ЕМКОСТЬ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Последовательное включение активного, индуктивного и емкостного сопротивлений. Полное сопротивление цепи, состоящей из последовательно включенных R, X_L и X_C (фиг. 2-16), равно

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + X^2}, \qquad (2\text{-}44)$$

т. е. является геометрической суммой активного сопротивления и полного реактивного сопротивления $X = X_L - X_C$.

Ток равен

$$I = \frac{U}{Z}, \qquad (2\text{-}45)$$

где U — приложенное к цепи напряжение.

Сдвиг фаз между током I и напряжением U определяется формулой

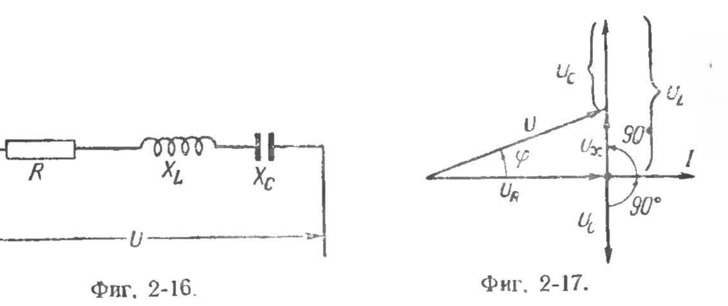
$$\cos\varphi = \frac{R}{Z} \qquad (2\text{-}46)$$

или

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{X}{R}. \qquad (2\text{-}47)$$

Падения напряжения на каждом элементе цепи равны:

$$\left.\begin{aligned} &\text{а) на активном} - U_R = IR;\\ &\text{б) на индуктивном} - U_L = IX_L;\\ &\text{в) на емкостном} - U_C = IX_C. \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}48)$$



Фиг. 2-16. Фиг. 2-17.

Приложенное к цепи напряжение U равно геометрической сумме (фиг. 2-17) падений напряжений на элементах цепи:

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} = \sqrt{U^2 + U_X^2} \qquad (2\text{-}49)$$

где $U_X = U_L - U_C$.

Резонанс напряжений. Частота f, при которой индуктивное и емкостное сопротивления равны друг другу и, следовательно, компенсируются, т. е. когда $X_L = X_C$ или $\omega L = \frac{1}{\omega C}$, называется резонансной частотой последовательной цепи или последовательного контура.

Резонансная частота

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \qquad (2\text{-}50)$$

где L — индуктивность, *гн*;

C — емкость, *ф*;

f_p — частота, *гц*.

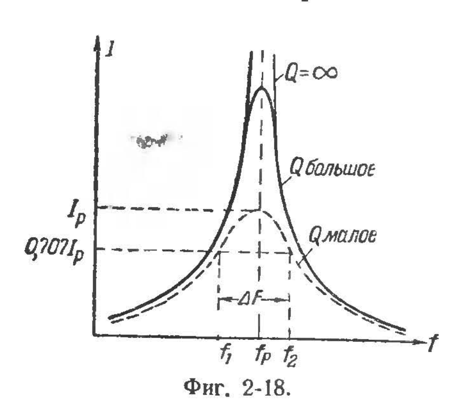
Ток при резонансе или резонансный ток равен

$$I_p = \frac{U}{R}. \qquad (2\text{-}51)$$

Сдвиг фаз между током и напряжением при резонансе равен нулю. Напряжения на емкости и индуктивности при резонансе равны соответственно

$$\left.\begin{aligned} U_C &= I_p X_C = \frac{U}{R} X_C \\ \text{и} \qquad U_L &= I_p X_L = \frac{U}{R} X_L, \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}52)$$

и так как $X_C = X_L$, то при резонансе $U_C = U_L$. Напряжение на емкости опережает ток на 90°, а напряжение на индуктивности отстает от тока на 90°. Эти напряжения направлены друг против друга и друг друга компенсируют. Такой резонанс носит название резонанса напряжений или последовательного резонанса.



Фиг. 2-18.

Если сопротивление R представляет собой сопротивление потерь в катушке и конденсаторе (как это обычно имеет место в радиочастотных цепях), то, учитывая, что потери в конденсаторе практически малы по сравнению с потерями в катушке, можно считать, что имеются потери только в катушке. Следовательно, при резонансе

$$U_L = U_C = UQ, \qquad (2\text{-}53)$$

где $Q = \frac{\omega L}{R} = \frac{1}{\omega CR}$ — добротность цепи (контура).

Ширина резонансной кривой (полоса пропускания контура). Кривая, изображающая изменение тока в цепи при изменении частоты приложенного напряжения с постоянной амплитудой, носит название резонансной кривой (фиг. 2-18) последовательной цепи.

Ширина кривой или полоса пропускаемых частот измеряется в точках, соответствующих 0,707 тока при резонансе, и определяется формулой

$$f_2 - f_1 = \frac{R}{2\pi L} \qquad (2\text{-}54)$$

или

$$\Delta F = f_2 - f_1 = \frac{f_p}{Q}. \qquad (2\text{-}55)$$

Отношение $\frac{\Delta F}{f_p}$ называется относительной полосой пропускания контура и определяется как

$$\frac{\Delta F}{f_p} = \frac{1}{Q} = \delta, \qquad (2\text{-}55\text{a})$$

где δ — затухание контура.

Величина Q является мерой избирательности контура (остроты настройки). Чем больше величина Q, тем меньше ширина резонансной кривой ΔF и тем больше избирательность контура.

Примеры и задачи.

2-47. Катушка с индуктивностью $L = 2$ *гн*, конденсатор емкостью $C = 16$ *мкф* и сопротивление $R = 600$ *ом* включены последовательно (фиг. 2-16). К цепи приложено напряжение $U = 250$ *в* с частотой $f = 50$ *гц*. Определить ток в цепи, угол сдвига фаз между U и I и мощность, поглощаемую в цепи.

Решение

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}};$$

$$X_L = 2\pi f L = 6{,}28 \cdot 50 \cdot 2 = 628 \text{ ом};$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{6{,}28 \cdot 50 \cdot 16 \cdot 10^{-6}} = 199 \text{ ом};$$

$$Z = \sqrt{600^2 + (628 - 199)^2} = \sqrt{600^2 + 429^2} = 737{,}1 \text{ ом};$$

$$I = \frac{250}{737{,}1} = 0{,}339 \text{ а};$$

$$\cos\varphi = \frac{R}{Z} = \frac{600}{737{,}1} = 0{,}815;$$

$$\varphi = 35°25';$$

$$P = UI\cos\varphi = 250 \cdot 0{,}339 \cdot 0{,}815 = 69 \text{ вт}$$

2-48. Определить падение напряжения на индуктивности, емкости и сопротивлении предыдущей задачи.

Решение

$$U_R = IR = 0{,}339 \cdot 600 = 203 \text{ в};$$
$$U_L = IX_L = 0{,}339 \cdot 628 = 215 \text{ в};$$
$$U_C = IX_C = 0{,}339 \cdot 199 = 67{,}5 \text{ в}.$$

Проверка:

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} = \sqrt{203^2 + (215 - 67{,}5)^2} =$$
$$= \sqrt{203^2 + 147{,}5^2} = 250 \text{ в}.$$

2-49. Чему равна кажущаяся мощность в задаче 2-47?

Ответ: 84,7 *ва*.

2-50. Ответьте на вопрос: отстает ли ток от напряжения в случае задачи 2-47 или опережает его? Начертите векторную диаграмму для напряжений.

Ответ: Ток отстает от напряжения.

2-51. Если в задаче 2-47 емкость $C = 1$ *мкф*, L и R остаются прежними, то какой сдвиг фаз будет в цепи: положительный или отрицательный? Начертите векторную диаграмму этой цепи.

Ответ: Ток будет опережать напряжение.

2-52. Дана цепь, показанная на фиг. 2-19. Найти ток в этой цепи, угол сдвига фаз и мощность, поглощаемую

Фиг. 2-19.

в цепи. $U = 30$ *в*; $f = 10^6$ *гц*; $R_1 = R_2 = 10$ *ом*; $C_1 = C_2 = 200$ *мкмкф*; $L_1 = 150$ *мкгн*; $L_2 = 100$ *мкгн*.

Ответ: $I = 0{,}83$ *а*;

$\cos\varphi = 0{,}555$; $\varphi \approx 56°$;
$P = 13{,}8$ *вт*.

2-53. Дана последовательная резонансная цепь, в которой $L = 725$ *мкгн*. Чему должна быть равна емкость

конденсатора, чтобы в этой цепи получился резонанс при частотах: а) 500 *кгц*; б) 880 *кгц*; в) 1,6 *мггц*?

Решение

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{или} \quad f^2 = \frac{1}{(2\pi)^2 LC},$$

откуда

$$C = \frac{1}{(2\pi)^2 L f^2};$$

$$\text{а) } C = \frac{1}{(6{,}28)^2 \cdot 725 \cdot 10^{-6} \cdot 500\,000^2} = \frac{1}{39{,}5 \cdot 725 \cdot 10^{-6} \cdot 25 \cdot 10^{10}} \text{ ф}$$

или

$$C = \frac{10^{12}}{39{,}5 \cdot 725 \cdot 10^{-6} \cdot 25 \cdot 10^{10}} = \frac{10^{12}}{715 \cdot 10^7} = 140 \text{ мкмкф}.$$

Аналогично:

б) 45 *мкмкф*;
в) 13,7 *мкмкф*.

2-54. Конденсатор переменной емкости с максимальной емкостью в 350 *мкмкф* используется для настройки приемника.

а) Чему должна быть равна индуктивность контура при установке конденсатора на максимальную емкость для настройки контура на частоту 500 *кгц*?

б) Чему будет равна наивысшая частота настройки цепи с найденной индуктивностью, если минимальная емкость конденсатора $C_{мин} = 15$ *мкмкф*?

Ответ: а) 289 *мкгн*; б) 2 416 *кгц*.

2-55. Как напишется формула для резонансной частоты контура, если емкость выразить в микромикрофарадах и индуктивность в микрогенри?

Ответ: $f_p = \dfrac{1{,}59 \cdot 10^8}{\sqrt{L_{мкгн} C_{мкмкф}}} \text{ гц} = \dfrac{159}{\sqrt{L_{мкгн} C_{мкмкф}}} \text{ мггц}.$

2-56. Если резонансная частота выражена в килогерцах, то как напишется формула для индуктивности L (*мгн*), если C дано в микромикрофарадах?

Ответ: $L_{мгн} = \dfrac{25{,}3 \cdot 10^6}{C_{мкмкф} f^2_{кгц}}.$

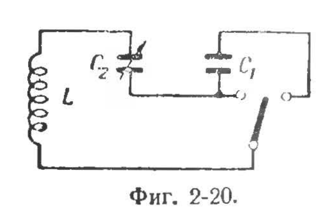
2-57. Если собственная (распределенная) емкость катушки в задаче 2-54 равна 15 *мкмкф*, то в каком

частотном диапазоне возможна настройка этого контура в резонанс?

Примечание. Собственную емкость катушки нужно рассматривать как емкость, подключенную параллельно емкости конденсатора настройки.

Ответ: 1,71 *мггц*—489 *кгц*.

2-58. Дан контур LC_2 (фиг. 2-20). Наивысшая частота, на которую он может быть настроен, равна 1 750 *кгц*. Для возможности настройки его на частоты от 1 750 *кгц* и выше последовательно с конденсатором переменной емкости C_2 включен конденсатор постоянной емкости C_1. Минимальная и максимальная емкости конденсатора C_2 равны соответственно 350 и 15 *мкмкф*. Индуктивность L катушки равна 290 *мкгн* и ее распределенная емкость C_0 равна 15 *мкмкф*.



Фиг. 2-20.

а) Определить необходимую величину емкости C_1. б) Чему равна наивысшая частота, на которую может быть настроен контур, принимая во внимание распределенную емкость катушки и найденную емкость C_1? в) Чему будет равна наивысшая резонансная частота контура, если пренебречь емкостью C_0, а минимальная емкость конденсатора $C_2 = 10$ *мкмкф*?

Ответ: а) 15,8 *мкмкф*;
б) 1,96 *мггц*;
в) 3,77 *мггц*.

2-59. Последовательный резонансный контур обладает активным сопротивлением $R = 10$ *ом* и индуктивным сопротивлением $X_L = 500$ *ом* при резонансной частоте. а) Какие напряжения получаются на индуктивности, емкости и сопротивлении при настройке этой цепи в резонанс, если приложенное к ней напряжение $U = 5$ *в*? б) Чему равна добротность Q контура? в) Чему равен сдвиг фаз между током и приложенным напряжением? г) Чему равен ток при резонансе? д) Чему равна поглощаемая в цепи мощность?

Решение

а) $U_L = U_C = U\frac{X_L}{R} = 5\cdot\frac{500}{10} = 250$ *в*; $U_R = U = 5$ *в*;

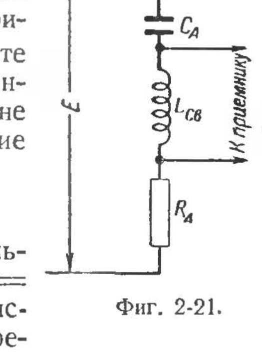
б) $Q = \frac{X_L}{R} = 50$;

в) $\varphi = 0°$;

г) $I_p = \frac{U}{R} = \frac{5}{10} = 0{,}5$ *а*;

д) $P = I_p^2 R = 0{,}5^2\cdot 10 = 2{,}5$ *вт*.

2-60. Антенная цепь радиоприемника (фиг. 2-21) может быть представлена в виде последовательно включенных индуктивности $L_A = 120$ *мкгн*, емкости $C_A = 100$ *мкмкф* и активного сопротивления $R_A = 15$ *ом*, последовательно с которыми включена катушка связи $L_{св} = 50$ *мкгн* входной цепи приемника. Прием ведется на частоте 1 200 *кгц*. Определить: а) ток в антенне, если индуктируемая в антенне э. д. с. $E = 120$ *мкв*; б) напряжение на катушке связи.



Фиг. 2-21.

Ответ: а) 2,8 *мка*; б) ≈ 1 *мв*.

2-61. Дана цепь из последовательно включенных $L = 106$ *мкгн* и $C = 106$ *мкмкф*. Определить резонансную частоту цепи и построить резонансные кривые в пределах $f_p \pm 30$ *кгц*, предполагая, что приложенное к цепи напряжение равно 500 *мв*. Кривые резонанса построить для двух случаев: а) $R = 5$ *ом* и б) $R = 10$ *ом*.

Ответ: 1 540 *кгц*.

2-62. Определить ширину каждой из резонансных кривых предыдущей задачи.

Ответ: а) $\Delta F = 7{,}7$ *кгц*; б) $\Delta F = 15{,}4$ *кгц*.

2-63. На основании ответов задачи 2-61 и 2-62 определить добротность контура в обоих случаях.

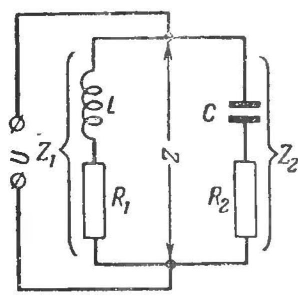
Ответ: а) $Q = 200$; б) $Q = 100$.

2-64. Активное сопротивление R резонансной последовательной цепи равно 5 *ом* и индуктивность L равна 225 *мкгн.* а) Чему равна ширина резонансной кривой? б) Если сопротивление цепи увеличить в три раза, то как изменится ширина резонансной кривой?

Ответ: а) 3 540 *гц.* б) Увеличится в три раза.

2-65. Антенна представляет собой последовательный резонансный контур, и для случая одного провода, подвешенного на открытом месте, приблизительно можно считать, что емкость этого контура $C'_A \approx 5$ *мкмкф* на каждый метр длины провода, а индуктивность $L'_A = 2$ *мкгн* на 1 *м* длины. Активное сопротивление антенного контура определяется, главным образом, качеством заземления. Как среднее значение для любительских антенн R_A можно принять равным от 15 до 25 *ом.* Пусть длина антенного провода равна 40 *м.* Найти резонансную частоту такой антенны.

Ответ: $f_p = 1\,260$ *кгц.*



Фиг. 2-22.

2-66. Антенну предыдущей задачи нужно настроить в резонанс на частоту 500 *кгц.* Для этого последовательно в антенну включена катушка $L_{св}$. Чему должна быть равна индуктивность этой катушки?

Ответ: 427 *мкгн.*

2-67. Антенну задачи 2-65 нужно настроить в резонанс на частоту 1 500 *кгц.* Что нужно для этого сделать?

Ответ: Включить последовательно в провод антенны конденсатор емкостью 400 *мкмкф.*

2-68. В антенне задачи 2-66 приходящей радиоволной индуктируется э. д. с. 400 *мкв.* Чему равен ток в антенне при настройке ее в резонанс, если $R_A = 20$ *ом*? Чему равно напряжение на индуктивности $L_{св}$? Какую мощность отдает в антенну приходящая радиоволна?

Ответ: 1) 20 *мка*; 2) 0,017 *в*; 3) 0,008 *мквт.*

Параллельное включение активного, индуктивного и емкостного сопротивлений. Наиболее часто встречаются в практике радиолюбителей параллельные цепи, состоящие из двух ветвей (фиг. 2-22), где Z_1 и Z_2 представляют полные сопротивления этих ветвей.

Эквивалентное полное сопротивление Z этой цепи определится как

$$Z = \frac{Z_1 Z_2}{\sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (X_L - X_C)^2}}. \qquad (2\text{-}56)$$

Ток в первой ветви равен

$$I_1 = \frac{U}{Z_1}. \qquad (2\text{-}57)$$

Ток во второй ветви равен

$$I_2 = \frac{U}{Z_2}. \qquad (2\text{-}58)$$

Ток в неразветвленной цепи равен

$$I = \frac{U}{Z}. \qquad (2\text{-}59)$$

Мощность, поглощаемая в ветвях, равна

$$P_1 = I_1^2 R_1;$$

$$P_2 = I_2^2 R_2, \qquad (2\text{-}60)$$

где R_1 и R_2—соответственно активные составляющие сопротивлений Z_1 и Z_2.

Полная мощность, поглощаемая в цепи, равна

$$P = P_1 + P_2. \qquad (2\text{-}61)$$

Произведение $IU = P_{ва}$ определяет кажущуюся мощность цепи в вольт-амперах, а частное $\frac{P}{P_{ва}}$ определяет косинус угла сдвига фаз между током I и напряжением U.

Резонанс токов. Для обычных радиотехнических цепей можно считать, что $Z_1 \approx X_L$ и $Z_2 \approx X_C$, и тогда эквивалентное сопротивление

$$Z \approx \frac{X_L \cdot X_C}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}, \qquad (2\text{-}62)$$

где $R = R_1 + R_2$. Обычно $R_2 \approx 0$, и тогда $R \approx R_1$.

Если частота напряжения, приложенного к параллельному контуру такова, что $X_L = X_C$, т. е. равна резонансной частоте последовательной цепи из L, R и C, то

$$Z_p = \frac{X_L X_C}{R} = \frac{L}{CR} = \frac{X_L^2}{R} = \frac{X_C^2}{R} = X_L Q = X_C Q, \qquad (2\text{-}63)$$

где Q — добротность контура.

Ток в неразветвленной цепи при настройке в резонанс равен

$$I_p = \frac{U}{Z_p}. \qquad (2\text{-}64)$$

Токи в ветвях определяются как

$$I_L = \frac{U}{Z_1} \approx \frac{U}{X_L} \approx I_C \approx \frac{U}{X_C}. \qquad (2\text{-}65)$$

Ток I_L отстает от напряжения U на угол, определяемый отношением $\operatorname{tg}\varphi = \frac{X_L}{R_1}$, и так как R_1 намного меньше X_L, то $\varphi \approx 90°$; ток I_C опережает U практически на 90°. Следовательно, I_L и I_C имеют противоположные направления и почти уравновешиваются. Этот случай называют резонансом токов или параллельным резонансом цепи.

Ток в неразветвленной цепи равен геометрической сумме токов I_L и I_C, а следовательно, имеет минимальное значение.

Так как Z_p имеет активный характер, то мощность, поглощаемая в цепи, может быть выражена как

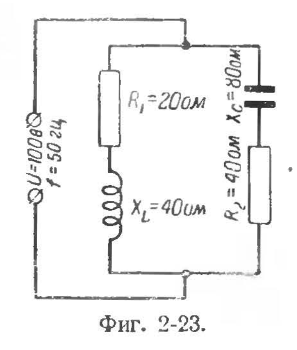
$$P = I_p^2 Z_p. \qquad (2\text{-}66)$$

С другой стороны, эта мощность расходуется в сопротивлении R_1 и поэтому она равна $P = I_L^2 R_1$. Приравнивая друг другу эти выражения, найдем, что

$$I_L \approx I_C = I_p Q, \qquad (2\text{-}67)$$

т. е. ток любой ветви больше тока неразветвленной цепи в Q раз.

Кривая, выражающая зависимость эквивалентного сопротивления Z параллельной цепи от частоты приложенного к ней напряжения с постоянной амплитудой, называется резонансной кривой параллельного контура и имеет вид, аналогичный фиг. 2-18, но по вертикальной оси вместо значений тока I откладываются значения эквивалентного сопротивления Z.



Фиг. 2-23.

Примеры и задачи.

2-69. Дан параллельный контур из двух ветвей (фиг. 2-23).

а) Найти ток, коэффициент мощности, мощность и угол сдвига фаз в каждой ветви.

б) Найти ток, поглощаемую мощность, кажущуюся мощность, коэффициент мощности и угол сдвига фаз для всей цепи.

Решение

а) $Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_L^2} = \sqrt{20^2 + 40^2} = \sqrt{2\,000} = 44{,}7$ *ом*;

$$I_1 = \frac{U}{Z_1} = \frac{100}{44{,}7} = 2{,}23 \text{ } a;$$

$$P_1 = I_1^2 R_1 = 2{,}23^2 \cdot 20 = 99{,}5 \text{ } вт;$$

$$\cos\varphi_1 = \frac{R_1}{Z_1} = \frac{20}{44{,}7} = 0{,}447;$$

$\varphi_1 = 63{,}5°$ (угол отставания I_L от U);

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_C^2} = \sqrt{40^2 + 80^2} = \sqrt{8\,000} = 89{,}4 \text{ } ом;$$

$$I_2 = \frac{U}{Z_2} = \frac{100}{89{,}4} = 1{,}12 \text{ } a;$$

$$P_2 = I_2^2 R_2 = 1{,}12^2 \cdot 40 = 50 \text{ } вт;$$

$$\cos\varphi_2 = \frac{R_2}{Z_2} = \frac{40}{89{,}4} = 0{,}447;$$

$\varphi_2 = 63{,}5°$ (угол опережения током I_C напряжения U);

$$б)\ Z = \frac{Z_1 Z_2}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}};$$

$$Z_1 + Z_2 = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (X_L - X_C)^2} =$$

$$= \sqrt{(20 + 40)^2 + (40 - 80)^2} = \sqrt{60^2 + (-40)^2} =$$

$$= \sqrt{3\,600 + 1\,600} = \sqrt{5\,200} = 72,1\ ом;$$

$$Z = \frac{44,7 \cdot 89,4}{72,1} = 55,5\ ом;$$

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{100}{55,5} = 1,8\ а;$$

$$P = P_1 + P_2 = 99,5 + 50 = 149,5\ вт;$$

$$P_{ва} = UI = 100 \cdot 1,8 = 180\ ва;$$

$$\cos\varphi = \frac{P}{P_{ва}} = \frac{100}{180} = 0,555;$$

$$\varphi = 56°\,20'.$$

2-70. Резонансная частота параллельной цепи (фиг. 2-22) равна 1 500 *кгц*. Индуктивное и емкостное сопротивления этой цепи при резонансе равны каждое 1 000 *ом*; активное сопротивление цепи равно 10 *ом*.

а) Чему равно эквивалентное сопротивление цепи при резонансной частоте? б) Чему равно эквивалентное сопротивление при 1 485 *кгц*, если индуктивное сопротивление равно 990 *ом* и емкостное — 1 010 *ом*? Чему равно Q контура?

Ответ: а) $Z_p = 100\,000$ *ом*;
б) $Z = 44\,718$ *ом*;
в) $Q = 100$.

2-71. Если к настроенной в резонанс цепи предыдущей задачи приложено напряжение 100 *в*, то чему равны токи в неразветвленной цепи и в ветвях цепи?

Ответ: $I_p = 1$ *ма*;
$I_L = I_C = 100$ *ма*.

2-72. Практически изготовленные сопротивления обладают индуктивностью и распределенной емкостью.

Эквивалентная схема такого сопротивления аналогична схеме, показанной на фиг. 2-22, причем можно считать, что $R_2 \approx 0$. Если 50-ваттное сопротивление в 2 000 *ом* обладает индуктивностью 3 *мкгн* и распределенной емкостью 2 *мкмкф*, то чему равно его эквивалентное сопротивление при частотах: а) 1 000 *кгц*; б) 60 *мггц*?

Ответ: а) 2 000 *ом*; б) 1 514 *ом*.

2-73. Первичная цепь трансформатора промежуточной частоты, резонансная частота которого равна 460 *кгц*, состоит из параллельно включенных катушки индуктивности и конденсатора, емкость которого может меняться от 70 до 140 *мкмкф*.

а) Чему должна быть равна индуктивность катушки, если контур настраивается в резонанс при емкости 105 *мкмкф*? б) Чему равно Q контура, если активное сопротивление его равно 12 *ом*? в) Чему равно резонансное сопротивление контура? г) Чему равен ток в неразветвленной цепи контура, если напряжение на его зажимах равно 50 *в*? д) Чему равны токи в индуктивной и емкостной ветвях при резонансе?

Ответ: а) 1 140 *мкгн*;
б) 274;
в) 900 000 *ом*;
г) 55,6 *мка*;
д) 15,2 *ма*.

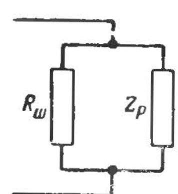
2-74. Параллельный резонансный контур используется в качестве „фильтра-пробки", чтобы заглушить помехи на частоте 1 300 *кгц*. Активное сопротивление контура равно 10 *ом*, а емкость монтажа равна 10 *мкмкф*. а) Чему должна быть равна индуктивность контура, если емкость конденсатора настройки равна 65 *мкмкф*? б) Чему равно Q контура? в) Какова ширина резонансной кривой этого контура?

Ответ: а) 199 *мкгн*;
б) 163;
в) 8 *кгц*.

2-75. Дан контур (задача 2-70, фиг. 2-22). а) Чему будет равно эквивалентное сопротивление этого контура,

если его шунтировать при настройке в резонанс активным сопротивлением $R_ш = 100000$ *ом*? б) Чему будет равна добротность этого шунтированного контура?

Решение. Так как при настройке контура в резонанс его сопротивление $Z_p = 100\,000$ *ом* и является по своему характеру активным сопротивлением, то при шунтировании этого контура сопротивлением $R_ш = 100\,000$ *ом* получается схема, показанная на фиг. 2-24, эквивалентное сопротивление которой



$$R_э = \frac{R_ш Z_p}{R_ш + Z_p} = \frac{100\,000 \cdot 100\,000}{200\,000} = 50\,000 \text{ ом}.$$

Так как настройка контура в резонанс при этом практически не меняется, то можно написать, что

Фиг. 2-24.

$$R_э = X_L Q_э \quad \text{или} \quad Q_э = \frac{R_э}{X_L} = \frac{50\,000}{1\,000} = 50.$$

Такое же уменьшение Q (со 100 до 50) получилось бы, если бы активное сопротивление контура было не 10, а 20 *ом*.

Действительно:

$$Q_э = \frac{X_L}{R}$$

или

$$R = \frac{X_L}{Q_э} = \frac{1\,000}{50} = 20.$$

Из решения задачи следует, что шунтирование контура большим активным сопротивлением $R_ш$ эквивалентно внесению в контур добавочного последовательно включенного сопротивления, определяемого по формуле

$$R_{доб} = \frac{X_L^2}{R_ш} = \frac{X_C^2}{R_ш}.$$

Действительно:

$$R_{доб} = \frac{1\,000^2}{100\,000} = 10 \text{ ом}.$$

Другими словами, шунтирование контура задачи 2-70 сопротивлением в 100 000 *ом* эквивалентно включению в контур добавочного сопротивления $R_{доб} = 20 - 10 = 10$ *ом*.

2-76. Как изменится ширина резонансной кривой контура задачи 2-75 по сравнению с шириной резонансной кривой задачи 2-70?

Ответ: Ширина резонансной кривой увеличится в два раза.

2-77. Каким сопротивлением нужно шунтировать параллельный резонансный контур, резонансное сопротивление Z_p которого равно 150 000 *ом*, чтобы ширина резонансной кривой его увеличилась в полтора раза?

Ответ: 300 000 *ом*.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

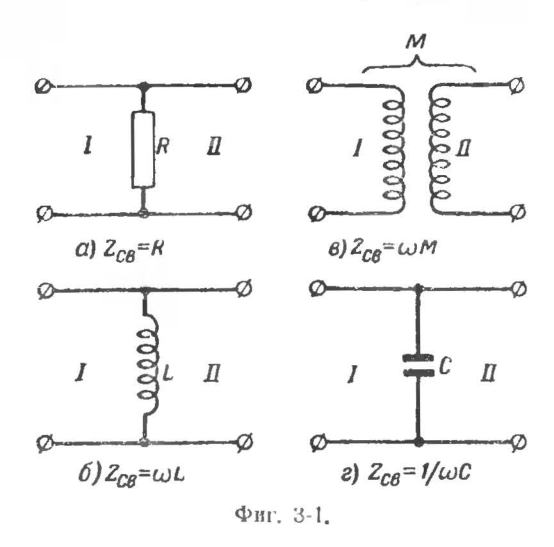
СВЯЗАННЫЕ ЦЕПИ

Общие соотношения в связанных цепях. Две цепи считаются связанными друг с другом, если они обладают одним общим для обеих цепей сопротивлением, которое позволяет осуществить передачу электрической энергии из одной цепи в другую. Это общее сопротивление называется сопротивлением связи $Z_{св}$. В зависимости от рода сопротивления связи различают следующие основные виды связи: гальваническая связь (фиг. 3-1, *а*), связь индуктивная — автотрансформаторная (фиг. 3-1, *б*) или трансформаторная (фиг. 3-1, *в*) и связь емкостная (фиг. 3-1, *г*). Возможны смешанные виды связи, когда сопротивление связи состоит из той или иной комбинации активных и реактивных сопротивлений.

Передача энергии из первичной цепи во вторичную цепь характеризуется коэффициентом связи. С точки зрения передачи энергии из одной цепи в другую различают три вида связи. Если из одной цепи в другую передается максимум энергии на одной частоте, то связь называется критической. Если коэффициент связи больше, чем это необходимо для передачи максимума энергии, связь называется сильной. Если коэффициент связи меньше, чем это необходимо для передачи максимума энергии, связь называется слабой.

Поскольку из первичной цепи во вторичную передается определенное количество энергии, определяемой

связью между этими цепями, то вторичная цепь оказывает на первичную влияние, которое выражается в изменении как ее активного, так и реактивного сопротив-



Фиг. 3-1.

лений. Численно это влияние определяется **коэффициентом трансформации** n, который выражается следующей формулой:

$$n=\frac{Z_2}{Z_{св}}, \tag{3-1}$$

где $Z_{св}$ — полное сопротивление связи;

Z_2 — полное сопротивление вторичной цепи.

Активное сопротивление первичной цепи всегда увеличивается на величину так называемого **добавочного вносимого активного сопротивления**

$$R_{вн}=\frac{R_2}{n^2}=\frac{Z_{св}^2}{Z_2^2}R_2, \tag{3-2}$$

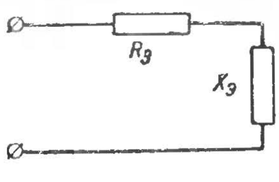
где R_2 — активное сопротивление вторичной цепи.

Реактивное сопротивление первичной цепи может уменьшаться или увеличиваться в зависимости от того, какое реактивное сопротивление преобладает во вторичной цепи: индуктивное или емкостное. Это **вносимое** в первичную цепь **реактивное сопротивление** численно определяется формулой

$$X_{вн}=\frac{X_2}{n^2}=\frac{Z_{св}^2}{Z_2^2}X_2, \tag{3-3}$$

где X_2 — полное реактивное сопротивление вторичной цепи.

При учете влияния вторичной цепи на первичную две связанные цепи могут быть заменены одной эквивалентной цепью, изображенной на фиг. 3-2, для которой **полное эквивалентное сопротивление** $Z_э$ равно



Фиг. 3-2.

$$Z_э=\sqrt{R_э^2+X_э^2}, \tag{3-4а}$$

где

$$R_э=R_1+R_{вн}=R_1+\frac{R_1}{n^2};$$

$$X_э=X_1-X_{вн}=X_1-\frac{X_1}{n^2}, \tag{3-4б}$$

если X_2 — индуктивное сопротивление, или

$$X_э=X_1+X_{вн}=X_1+\frac{X_2}{n^2}, \tag{3-4в}$$

если X_2 — емкостное сопротивление.

Выражение (3-4б) определяет реактивное сопротивление **остаточной результирующей индуктивности** двух связанных цепей или **результирующей индуктивности рассеяния**, которые могут быть представлены как

$$X_{рас}=X_1(1-k^2) \tag{3-4г}$$

или

$$L_{рас}=L_1(1-k^2), \tag{3-4д}$$

где k — коэффициент связи.

Ток I_1 в эквивалентной первичной цепи равен

$$I_1 = \frac{U}{Z_э}, \qquad (3\text{-}5)$$

где U — напряжение, приложенное к первичной цепи.

Коэффициент мощности эквивалентной первичной цепи равен

$$\cos\varphi_э = \frac{R_э}{Z_э}. \qquad (3\text{-}6)$$

Мощность, поглощаемая в эквивалентной первичной цепи, равна

$$P = UI_1\cos\varphi_э = I_1^2 R_э. \qquad (3\text{-}7)$$

Электродвижущая сила, индуктируемая во вторичной цепи, равна

$$E_2 = I_1 Z_{св}. \qquad (3\text{-}8)$$

Ток во вторичной цепи равен

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_2}. \qquad (3\text{-}9а)$$

Мощность, поглощаемая во вторичной цепи, равна

$$P_2 = E_2 I_2 \cos\varphi_2 = \frac{E_2^2}{R_2} = I_2^2 R_2. \qquad (3\text{-}9б)$$

Наиболее частым видом связи является связь индуктивная — трансформаторная (фиг. 3-1, *в*).

Тогда

$$n = \frac{Z_2}{\omega M} = \frac{Z_2}{\omega k\sqrt{L_1 L_2}}, \qquad (3\text{-}10)$$

где k — коэффициент связи, а L_1 и L_2 — индуктивности первичной и вторичной цепей.

Если R_2 намного меньше X_2, что часто бывает на практике, то $Z_2 \approx X_2 = \omega L_2$ и, следовательно,

$$n = \frac{1}{k}\sqrt{\frac{L_2}{L_1}}. \qquad (3\text{-}11а)$$

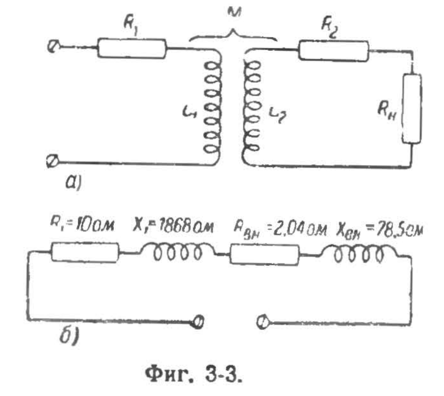
Когда первичная и вторичная обмотки пронизываются одним и тем же магнитным потоком и имеют приблизительно одинаковые размеры, как это бывает в случае трансформаторов с магнитным сердечником, то $k \approx 1$, и индуктивности обмоток относятся друг к другу как квадраты чисел витков их обмоток. Тогда

$$n = \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} = \frac{w_2}{w_1} \qquad (3\text{-}11б)$$

(см. задачу 1-54).

Примеры и задачи.

3-1. Трансформатор (фиг. 3-3, *а*) питается током с частотой 175 *кгц* и имеет следующие данные: $L_1 = 1{,}7$ *мгн* и $R_1 = 10$ *ом*; $L_2 = 3{,}5$ *мгн* и $R_2 = 20$ *ом*. Взаимная индуктивность M между L_1 и L_2 равна 0,5 *мгн*. Вторичная цепь нагружена на активное сопротивление $R_н = 80$ *ом*. а) Чему равен коэффициент трансформации? б) Какие активное и реактивное сопротивления вносятся в первичную цепь вторичной цепью? в) Начертите эквивалентную схему трансформатора. г) Чему равно полное сопротивление эквивалентной цепи? д) Какой ток проходит в первичной цепи, если к ней приложено напряжение 10 *в*? е) Чему равна э. д. с. во вторичной цепи? ж) Какой ток проходит во вторичной цепи? з) Какая мощность поглощается в первичной цепи? и) Какая мощность выделяется в нагрузочном сопротивлении $R_н$? к) Чему равен к. п. д. схемы?



Фиг. 3-3.

Решение

а) $n = \frac{Z_2}{\omega M} = \frac{\sqrt{(R_2 + R_н)^2 + (2\pi f L_2)^2}}{2\pi f M} =$

$= \frac{\sqrt{(20+80)^2 + (6,28\cdot175\cdot10^3\cdot3,5\cdot10^{-3})^2}}{6,28\cdot175\cdot10^3\cdot0,5\cdot10^{-3}} = \frac{\sqrt{100^2 + 3\,840^2}}{550} =$

$= \frac{3\,840}{550} = 7.$

б) $R_{вн} = \frac{R_2 + R_н}{n^2} = \frac{20+80}{49} = 2,04$ *ом*;

$X_{вн} = \frac{X_2}{n^2} = \frac{2\pi f L_2}{n^2} = \frac{3\,840}{49} = 78,5$ *ом*;

в) см. фиг. 3-3,б;

г) $R_э = R_1 + R_{вн} = 10 + 2,04 = 12,04$ *ом*;

$X_э = X_1 - X_{вн} = 6,28\cdot175\cdot10^3\cdot1,7\cdot10^{-3} - 78,5 =$
$= 1\,863 - 73,5 = 1\,789,5$ *ом*;

$Z_э = \sqrt{R_э^2 + X_э^2} = \sqrt{12,04^2 + 1\,789,5^2} \approx 1\,789$ *ом*;

д) $I_1 = \frac{U}{Z_э} = \frac{10}{1\,789,5} = 5,58$ *ма*;

е) $E_2 = I_1 Z_{св} = I_1 \omega M = I_1 2\pi f M = 550\cdot0,00558 = 3,06$ *в*;

) $I_2 = \frac{E_2}{Z_2} = \frac{3,06}{3\,840} = 0,000795$ *а* $= 0,795$ *ма*;

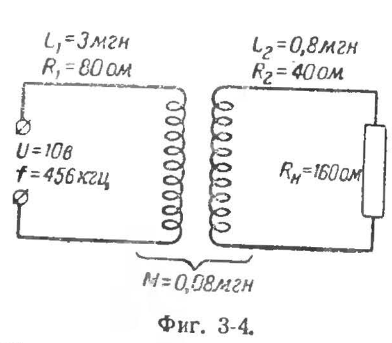
) $P = I_1^2 R_э = 0,00558^2\cdot12,04 = 0,375$ *мвт*;

и) $P_н = I_2^2 R_н = 0,000795^2\cdot80 = 0,051$ *мвт*;

к) $\eta = \frac{P_н}{P} = \frac{0,051}{0,375} = 0,136$, или 13,6%.

3-2. На фиг. 3-4 изображены индуктивно связанные цепи. Значения их элементов указаны на схеме. Найти: а) n; б) $R_{вн}$; в) $X_{вн}$; г) $Z_э$ первичной цепи; д) ток I_1 первичной цепи; е) э. д. с., индуктированную во вторичной цепи; ж) ток I_2 во вторичной цепи.

Ответ: а) 10; б) 2 *ом*; в) 22,9 *ом*; г) 8 577 *ом*; д) 1,14 *ма*; е) 0,27 *в*; ж) 0,117 *ма*.



Фиг. 3-4.

3-3. Пользуясь формулой (3-11а), найти для случая предыдущей задачи коэффициент связи между первичной и вторичной цепями.

Ответ: 0,0516.

3-4. Антенна задачи 2-68 индуктивно связана с контуром детекторного приемника (фиг. 3-5). Коэффициент связи между антенной и контуром $k = 3\%$. Емкость конденсатора настройки приемника $C_2 = 250$ *мкмкф*. Определить: а) необходимую для настройки на частоту 500 *кгц* индуктивность контура приемника; б) какое напряжение подается на зажимы детекторной цепи приемника, если активное сопротивление контура $R_2 = 15$ *ом*, а сопротивление детекторной цепи $R_д = 10\,000$ *ом*. Индуктируемая в антенне приходящей волной э. д. с. равна 400 *мкв*.

Решение

а) $L_2 = \frac{25,3\cdot10^6}{f_p^2 C_2} = \frac{25\,300}{0,5^2\cdot250} = 405$ *мкгн*.

б) Напряжение, подаваемое на детекторную цепь, равно напряжению U_C на конденсаторе C_2, которое, в свою очередь, равно $U_C = E_2 Q_2$, где E_2 — э. д. с., индуктируемая антенной в контуре; Q_2 — добротность контура, равная $Q_2 = \frac{\omega L_2}{R_к}$. Так как контур шунтируется сопротивлением детекторной цепи, то $R_к = R_2 + R_{вн}$, где $R_{вн} = \frac{X_C^2}{R_д}$ (см. решение задачи 2-75).

$$R_{вн} = \frac{\left(\frac{1}{\omega C_2}\right)^2}{R_д} = \frac{1}{(6,28\cdot5\cdot10^5\cdot250\cdot10^{-12})^2\cdot10^4} = \frac{1\,270}{10^4} = 162 \text{ ом}.$$

Следовательно,

$$R_к = 15 + 162 = 177 \text{ ом}. \quad Q_2 = \frac{6,28\cdot5\cdot10^5\cdot405\cdot10^{-6}}{177} = 7,2.$$

(ср. с Q_2' контура без шунтирующей его детекторной цепи). Для определения E_2 нужно найти сначала ток I_A в антенне:

$$I_A = \frac{E_A}{R_{АП}},$$

где $R_{АП}$ — полное сопротивление антенны, состоящее из $R_A = 20$ *ом* и $R_{вн}'$ — сопротивления, вносимого в антенну контуром

$R'_{вн}=\frac{\omega^2 M^2}{R_к}$. Так как коэффициент связи между контуром и антенной задан ($k=0{,}03$), то $M=k\sqrt{L_2 L_{АП}}$, где $L_{АП}=L_A+L_{св}$; $L_A=40\cdot 2=80$ *мкгн* и $L_{АП}=80+427=507$ *мкгн*. Следовательно,

$$M=0{,}03\sqrt{405\cdot 507}=0{,}3\cdot 453=13{,}6 \text{ мкгн}.$$

Тогда

$$\omega M=6{,}28\cdot 5\cdot 10^5\cdot 13{,}6\cdot 10^{-6}=42{,}7 \text{ ом}$$

и

$$R'_{вн}=\frac{42{,}7^2}{177}=10{,}3 \text{ ом}.$$

$$R_{АП}=20+10{,}3=30{,}3 \text{ ом}.$$

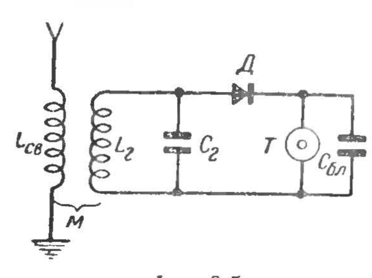
Ток в антенне $I_A=\frac{E_A}{R_{АП}}=\frac{400}{30{,}3}=13{,}2$ *мка*.

$$E_2=\omega M I_A=42{,}7\cdot 13{,}2=560 \text{ мкв}.$$

Напряжение на зажимах детекторной цепи равно

$$U_C=E_2 Q_2=560\cdot 7{,}2\approx 4\,000 \text{ мкв}=4 \text{ мв}.$$

3-5. Рассчитать детекторный приемник по схеме фиг. 3-5 для приема радиоволн с частотой 200 *кгц*, если длина антенны — 25 *м*, сопротивление заземления — 10 *ом*. Емкость конденсатора настройки вторичного контура равна 450 *мкмкф*. Определить напряжение на зажимах детекторной цепи приемника, если в антенне индуктируется э. д. с. 500 *мкв*, коэффициент связи между антенной и контуром L_2C_2 $k=2\%$, сопротивление контура $R_2=15$ *ом* и сопротивление детекторной цепи равно 17 700 *ом*.



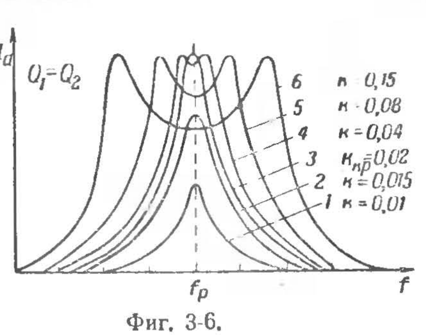
Фиг. 3-5.

Ответ: $U_C=9{,}45$ *мв*.

3-6. Рассчитать индуктивность L_2 детекторного приемника по схеме фиг. 3-5 для приема сигналов с частотой 200 *кгц*, если длина антенны — 25 *м*, сопротивление заземления — 10 *ом*, индуктивность антенной катушки $L_{св}=5\,000$ *мкгн*, емкость конденсатора настройки вторичного контура — 450 *мкмкф*, коэффициент связи между антенной и контуром L_2C_2 $k=2\%$, сопротивление контура $R_к=45$ *ом*, сопротивление детекторной цепи $R_д=17\,500$ *ом*. Определить напряжение, подводимое к детекторной цепи приемника, если в антенне индуктируется э. д. с. 500 *мкв*.

Ответ: $L_2=1\,400$ *мкгн*;
$U_C\approx 1{,}5$ *мв*.

Резонансные кривые связанных цепей. Резонансные кривые связанных цепей показывают изменения тока в первичной и вторичной цепях в зависимости от частоты подводимого к первичной цепи напряжения при постоянной его амплитуде и неизменной настройке цепей. Форма резонансных кривых связанных цепей зависит от коэффициента связи между контурами и добротностей контуров. Наибольший интерес представляют кривые резонанса для тока во вторичной цепи. При данных контурах, имеющих добротности Q_1 и Q_2, при увеличении связи ток во вторичной цепи возрастает и достигает максимального значения при критической связи, определяемой формулой



Фиг. 3-6.

$$k_{кр}=\frac{1}{\sqrt{Q_1 Q_2}}. \qquad (3\text{-}12)$$

После превышения критической связи в резонансных кривых вторичного тока появляется провал на резонансной частоте — резонансная кривая становится двугорбой (фиг. 3-6). При соответствующих величинах k и Q контуров можно получить кривую резонанса с плоской вершиной или небольшим провалом и тем самым обеспечить относительно равномерное воспроизведение некоторой полосы частот. На практике подобные устройства называют **полосовыми фильтрами**. Ширина вершины резонансной кривой двух связанных контуров определяется главным образом коэффициентом связи между контурами, а прямолинейность этой вершины зависит в основном от Q контуров: большие величины

связи соответствуют широким вершинам; большие Q дают два ясно выраженных максимума, а малые Q вызывают закругление вершины.

Для приближенного подсчета в случае приблизительно одинаковых Q_1 и Q_2, что обычно и бывает на практике, можно пользоваться следующим правилом: достаточно плоская вершина резонансной кривой для двух связанных контуров с одинаковыми резонансными частотами f_p может быть обеспечена для полосы частот $\Delta F_{св}$ приблизительно равной

$$\Delta F_{св} \approx 1{,}2kf_p, \qquad (3\text{-}13)$$

где k—фактический коэффициент связи между этими контурами, который в этом случае должен браться равным

$$k = 1{,}75k_{кр} = \frac{1{,}75}{\sqrt{Q_1 Q_2}}. \qquad (3\text{-}14)$$

Если $Q_1 = Q_2 = Q$, т. е. контуры одинаковы, то $k = 1{,}75k_{кр} = \frac{1{,}75}{Q}$, и тогда

$$\Delta F_{св} \approx 2{,}1\frac{f_p}{Q} = 2{,}1\Delta F, \qquad (3\text{-}15а)$$

т. е. ширина полосы пропускания в этом случае в 2,1 раза больше полосы пропускания ΔF одиночного контура с таким же Q. Если связь между контурами с одинаковыми f_p и Q равна критической связи ($k = k_{кр}$), то

$$\Delta F_{св} \approx 1{,}41\frac{f_p}{Q} = 1{,}41\ \Delta F, \qquad (3\text{-}15б)$$

т. е. в этом случае ширина полосы пропускания только на 40% больше ширины полосы пропускания одиночного контура.

Когда связь между контурами с одинаковыми f_p и Q равна $k \approx 0{,}67k_{кр}$, то

$$\Delta F_{св} \approx \Delta F, \qquad (3\text{-}15в)$$

т. е. система связанных контуров в этом случае пропускает такую же полосу, как и одиночные контуры, составляющие эту систему.

При дальнейшем уменьшении связи система связанных контуров будет действовать в роли полосового фильтра хуже, чем одиночный контур.

Примеры и задачи.

3-7. Чему равна ширина полосы частот, пропускаемой полосовым фильтром, работающим при резонансной частоте $f_p = 456$ *кгц* и при $k = 0{,}02$, если $k = 1{,}75\ k_{кр}$ и $Q_1 = Q_2$?

Ответ: 11 000 *гц*.

3-8. Полосовой фильтр настроен на резонансную частоту 456 *кгц*. Если $k = 1{,}75\ k_{кр}$, то чему должны быть равны $Q_1 = Q_2$, чтобы фильтр пропускал полосу частот $\Delta F_{св} = 8$ *кгц*?

Решение. Находим $k = \frac{\Delta F_{св}}{1{,}2f_p} = \frac{8}{456 \cdot 1{,}2} = 0{,}0146$;

$$Q_1 = Q_2 = Q = \frac{1{,}75}{0{,}0146} = 120.$$

3-9. а) Чему равна ширина полосы пропускания полосового фильтра, работающего на частоте 260 *кгц* и при коэффициенте связи $k = 0{,}03$, если $k_{кр} = 0{,}017$? б) Если $Q_1 = Q_2$, то чему равны их численные значения? в) Чему будет равна $\Delta F_{св}$, если добротность контуров уменьшить в 1,5 раза и коэффициент связи взять равным $k = 0{,}045$?

Ответ: а) 9,4 *кгц*; б) 58,5; в) 14 *кгц*.

3-10. Полосовой фильтр в усилителе промежуточной частоты должен пропускать полосу частот 10 *кгц*. Q контуров равны $Q_1 = Q_2 = Q = 40$ и $k = 1{,}75\ k_{кр}$. а) Чему равен коэффициент связи? б) Чему равны пределы частот, пропускаемых фильтром? в) Чему должны быть равны емкости конденсаторов фильтра, если индуктивность в каждом контуре равна 6 *мгн*? г) Чему равны активные сопротивления контуров?

Ответ: а) 0,0437; б) 185 и 195 *кгц*; в) 117 *мкмкф*; г) 180 *ом*.

3-11. Если электрически связать два контура задачи 2-61 (для $R = 5$ *ом*), то чему будет равна ширина полосы пропускания такой системы при связи между контурами: а) $k = 0{,}0335$; б) $k = 0{,}005$; в) $k = 0{,}00875$?

Ответ: а) 7,7 *кгц*; б) 10,85 *кгц*; в) 16,1 *кгц*.

Связанные цепи с коэффициентом связи $k \approx 1$ (трансформатор с ферромагнитным сердечником). При $k \approx 1$ на основании формул (1-19), (1-34) и (3-11б) получаем:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{w_2}{w_1} = n \text{ или } E_2 = \frac{w_2}{w_1} E_1 = nE_1, \qquad (3\text{-}16)$$

т. е. отношение э. д. с. (или приближенно отношение напряжений) в обмотках трансформатора с магнитным сердечником равно коэффициенту трансформации или обратной его величине.

Задачи и примеры.

3-12. Коэффициент трансформации повышающего трансформатора равен двум. К первичной обмотке приложено напряжение 10 *в*. Чему равно напряжение на вторичной обмотке?

Ответ: 20 *в*.

3-13. Первичная обмотка трансформатора имеет 1 200 витков и к ней приложено напряжение 220 *в*. Сколько витков должно быть во вторичной обмотке, если на ней нужно получить напряжение 6,3 *в*?

Ответ: 34 витка.

3-14. Повышающий трансформатор с коэффициентом трансформации $n = 5$ отдает в нагрузочное сопротивление мощность 5 *вт* при напряжении 30 *в*. Чему равен ток в первичной цепи?

Решение. Полагая, что к. п. д. трансформатора равен 100%, т. е. что вся мощность, получаемая первичной обмоткой от сети, передается во вторичную обмотку (что очень близко к действительности), можем написать:

ток в первичной цепи × напряжение в первичной цепи = = току во вторичной цепи × напряжение во вторичной цепи, т. е.

$$I_1 U_1 = I_2 U_2;$$

откуда

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} = n$$

или

$$I_1 = I_2 n = 5I_2.$$

Так как

$$I_2 = \frac{P_2}{U_2},$$

то

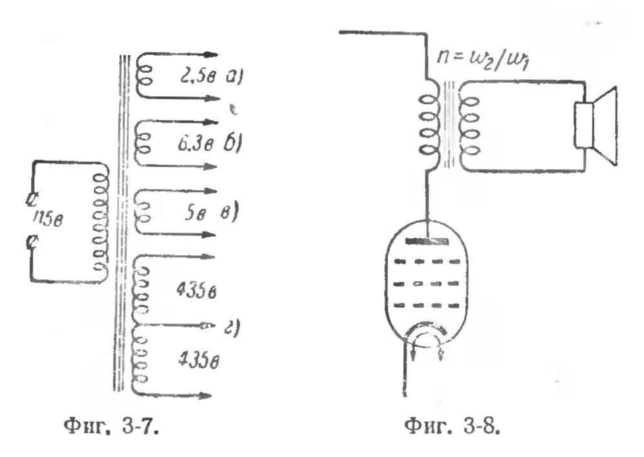
$$I_1 = \frac{5 \cdot 5}{30} = \frac{5}{6}\ a = 0{,}83a.$$

3-15. Необходимо обеспечить накал пятилампового приемника: 6,3 *в* и 0,3 *а* для каждой лампы. Нити накала ламп включены все параллельно. Трансформатор включен в сеть 220 *в*. Определить необходимый коэффициент трансформации и ток, который будет проходить через первичную обмотку трансформатора.

Ответ: $n = 1:35$ (понижающий трансформатор);
$I_1 = 43$ *ма*.

3-16. Показанный на фиг. 3-7 трансформатор имеет в первичной обмотке 460 витков. Сколько витков содержит каждая из вторичных обмоток?

Ответ: а) 10 витков; б) 25 витков;
в) 20 витков; г) 3 480 витков.



Фиг. 3-7. Фиг. 3-8.

3-17. Оконечная лампа приемника требует оптимального нагрузочного сопротивления $R_{опт} = 2\,500$ *ом*. К этой лампе подключена через трансформатор (фиг. 3-8) звуковая катушка динамического громкоговорителя, активное сопротивление которой $R_{зк} = 4$ *ом*. Чему должен быть равен коэффициент трансформации выходного трансформатора?

Решение. Согласно формуле (3-2) получаем

$$n = \sqrt{\frac{R_2}{R_{вн}}} = \sqrt{\frac{R_{зк}}{R_{опт}}} = \sqrt{\frac{4}{2\,500}} = 1:25.$$

3-18. Определить нагрузочное сопротивление лампы, работающей через трансформатор с $n = 1:23$ на громкоговоритель, активное сопротивление звуковой катушки которого равно 8 *ом*.

Ответ: 4 232 *ом*.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ
УСИЛИТЕЛИ

1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОННЫХ ЛАМП

Экономичность катода. Экономичность катода определяется формулой

$$H = \frac{I_e}{P_н}, \qquad (4\text{-}1)$$

где H — *ма/вт*;
I_e — ток эмиссии, *ма*;
$P_н$ — мощность, расходуемая на нагревание катода, *вт*.

Примеры и задачи.

4-1. Определить экономичность катода лампы 6С4Б (6Ф5).

Решение. Мощность накала лампы 6Ф5 $P_н = 6{,}3\ в \cdot 0{,}3\ а = 1{,}89\ вт$ и ток эмиссии $I_e = 35\ ма$. Согласно формуле (4-1)

$$H = \frac{35}{1{,}89} = 18{,}5\ ма/вт.$$

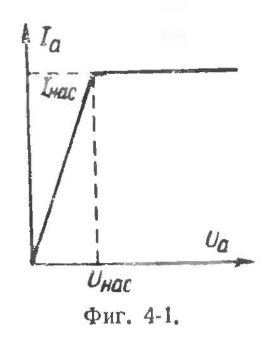
4-2. Экономичность катода лампы 6С5Б (6С5) равна 31,8 *ма/вт*, а нормальная мощность накала — 1,89 *вт*. Определить ток эмиссии.

Ответ: 60 *ма*.

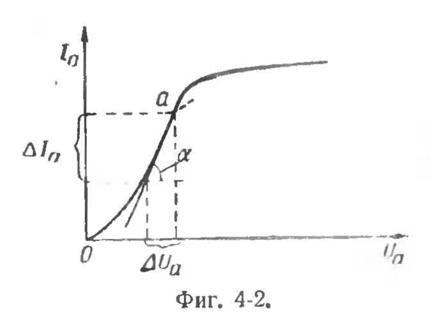
Статические характеристики и параметры электронных ламп. Средняя крутизна вольтамперной характеристики двухэлектродной лампы (диода) определяется как

$$S_{ср} = \frac{I_{нас}}{U_{нас}}, \qquad (4\text{-}2)$$

где $S_{ср}$ — средняя крутизна, *ма/в*;
$I_{нас}$ — ток насыщения, *ма*;
$U_{нас}$ — напряжение насыщения, *в* (фиг. 4-1).



Фиг. 4-1.



Фиг. 4-2.

Крутизна на малом участке вольтамперной характеристики диода (фиг. 4-2) определяется как

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_a}, \qquad (4\text{-}3)$$

где S — крутизна, *ма/в*;
ΔU_a — изменение напряжения на аноде, *в*;
ΔI_a — соответствующее изменение анодного тока, *ма*.

Внутреннее сопротивление диода переменному току определяется как

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = \frac{1}{S}\ ом. \qquad (4\text{-}4)$$

Сопротивление диода постоянному току определяется формулой

$$R_{i\,пост} = \frac{U_a}{I_a}\ ом. \qquad (4\text{-}5)$$

Между R_i и $R_{i\,пост}$ диода существует соотношение

$$R_{i\,пост} \approx 1{,}5\ R_i \text{ или } R_i \approx 0{,}66\ R_{i\,пост}. \qquad (4\text{-}6)$$

Совместное действие напряжений на аноде и на сетке трехэлектродной лампы может быть заменено действием одного так называемого результирую-

щего напряжения, приложенного к сетке и определяемого по формуле

$$U_{рез} = U_c + DU_a, \qquad (4\text{-}7а)$$

где U_c — сеточное напряжение, *в*;

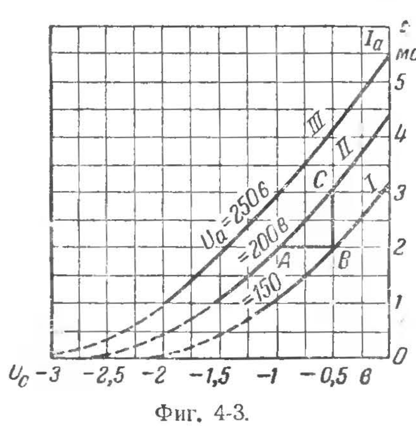
U_a — анодное напряжение триода, *в*;

D — проницаемость лампы.

Напряжение сетки, при котором анодный ток равен нулю, называемое напряжением отсечки, определяется по формуле

$$U_{c\ отс} = -DU_a. \qquad (4\text{-}7б)$$

Проницаемость лампы определяется (фиг. 4-3) как



Фиг. 4-3.

$$D = -\frac{\Delta U_c}{\Delta U_a} = -\frac{AB}{U_{a\,II} - U_{a\,I}} \qquad (4\text{-}8)$$

при условии, что I_a остается неизменным, или

$$D\% = 100 \cdot \frac{\Delta U_c}{\Delta U_a}.$$

Коэффициент усиления лампы определяется как

$$\mu = \frac{1}{D}. \qquad (4\text{-}9)$$

Крутизна характеристики триода определяется как

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_c} = \frac{BC}{AB} \text{ при } U_a \text{ постоянном (фиг. 4-3).} \qquad (4\text{-}10)$$

Внутреннее сопротивление триода определяется как

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = \frac{U_{a\,II} - U_{a\,I}}{BC} \qquad (4\text{-}11)$$

при U_c постоянном (фиг. 4-3) и является сопротивлением лампы переменному току.

Сопротивление триода постоянному току определяется как

$$R_{i\ пост} = \frac{U_a}{I_a}. \qquad (4\text{-}12)$$

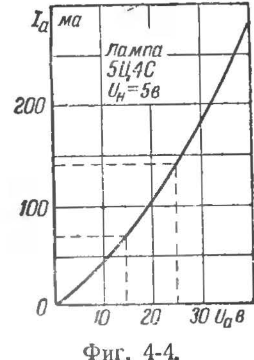
Между крутизной, проницаемостью и внутренним сопротивлением триода существует соотношение

$$SDR_i = 1, \qquad (4\text{-}13)$$

где S выражена в *а/в* и R_i в *ом*,

или

$$SR_i = \mu. \qquad (4\text{-}14)$$



Фиг. 4-4.

Примеры и задачи.

4-3. Определить параметры кенотрона 5ВХ1 (5Ц4-С) в прямолинейной части характеристики (фиг. 4-4).

Решение. Определяем напряжения и токи в двух точках прямолинейной части характеристики, например:

$$U_{a1} = 15\ в;\quad U_{a2} = 25\ в;\quad I_{a1} = 70\ ма;\quad I_{a2} = 140\ ма,$$

тогда

$$S = \frac{140 - 70}{25 - 15} = 7\ ма/в;$$

$$R_i = \frac{1}{S} = \frac{1}{7 \cdot 10^{-3}} = 143\ ом;$$

$$R_{i\ пост} = 1{,}5 R_i = 214\ ом.$$

4-4. Крутизна характеристики диода 6Х6Б (6Х6) на некотором участке равна 2 *ма/в*. Определить внутренние сопротивления R_i и $R_{i\ пост}$ диода.

Ответ: $R_i = 500\ ом$; $R_{i\ пост} = 750\ ом$.

4-5. Проницаемость триода $D = 6\%$, результирующее напряжение на сетке $U_{рез} = 10{,}4\ в$ при напряжении сетки $U_c = -4\ в$. Определить: а) анодное напряжение U_a; б) напряжение $U_{c\ отс}$, при котором $I_a = 0$.

Решение.

а) $U_a = \frac{U_{рез} - U_c}{D} = \frac{10{,}4 + 4}{0{,}06} = 240\ в.$

Напряжение смещения, при котором лампа запирается,
б) $U_{c\,отс} = -DU_a = -0{,}06 \cdot 240 = -14{,}4$ *в*.

4-6. Для прямолинейного участка сеточной характеристики триода получены следующие данные (фиг. 4-3):

если $U_a = 150$ *в*, то $I_a = 2$ *ма* при $U_c = -0{,}5$ *в*;

если $U_a = 200$ *в*, то $I_a = 3$ *ма* при $U_c = -0{,}5$ *в* и

$I_a = 2$ *ма* при $U_c = -1$ *в*.

Определить крутизну S, внутреннее сопротивление R_i, сопротивление лампы постоянному току $R_{i\,пост}$, проницаемость D и коэффициент усиления μ лампы.

Ответ: $S = 2$ *ма/в*; $R_i = 50\,000$ *ом*; $R_{i\,пост}$ различно, например $R_{i\,пост} = 75\,000$ *ом* для точки B, $R_{i\,пост} = 67\,000$ *ом* для точки C, $R_{i\,пост} = 50\,000$ *ом* для точки A; $D = 0{,}01 = 1\%$; $\mu = 100$.

4-7. Определить R_i триода 6С6 (6В4), если в рабочей точке крутизна равна 5,25 *ма/в*, а коэффициент усиления равен 4,2.

Ответ: $R_i = 800$ *ом*.

4-8. Тетрод 6П3 (6Л6) имеет в рабочей точке крутизну $S = 6$ *ма/в* и внутреннее сопротивление $R_i = 22\,500$ *ом*. Определить коэффициент усиления.

Ответ: $\mu = 135$.

4-9. Пентод 6Ж14Б (6АС7) имеет в рабочей точке коэффициент усиления $\mu = 6\,750$ и внутреннее сопротивление $R_i = 750\,000$ *ом*. Найти крутизну характеристики в этой точке.

Ответ: $S = 9$ *ма/в*.

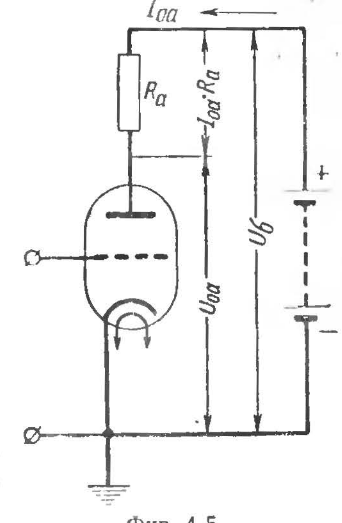
Динамические характеристики и параметры электронных ламп. Если анодный источник подключен непосредственно к аноду и катоду усилительной лампы, то сеточные и анодные характеристики лампы представляют собой статические характеристики, а напряжение на аноде лампы равно напряжению источника тока.

Примечание. В дальнейшем для токов и напряжений в ламповых цепях приняты следующие обозначения:
U_0 — постоянное напряжение;
I_0 — постоянный ток;

$U_б$ — напряжение анодного источника;
u — мгновенное значение напряжения;
U — амплитуда переменного напряжения;
i — мгновенное значение тока;
I — амплитуда переменного тока.

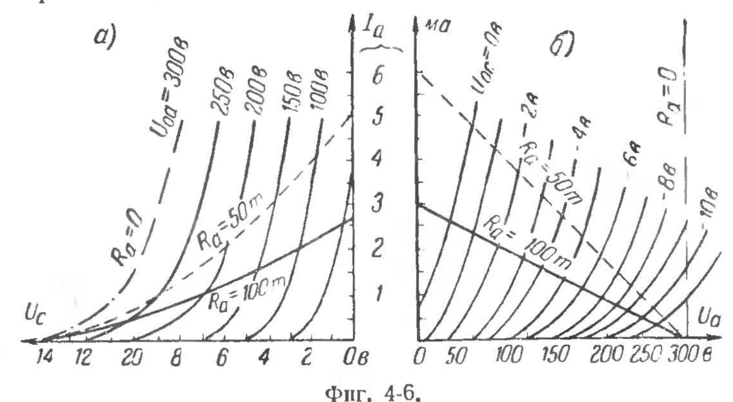
Когда в анодную цепь усилительной лампы включено активное сопротивление R_a (фиг. 4-5), то напряжение на аноде лампы равно

$$U_{0a} = U_б - I_{0a}R_a. \quad (4\text{-}15)$$



Фиг. 4-5.

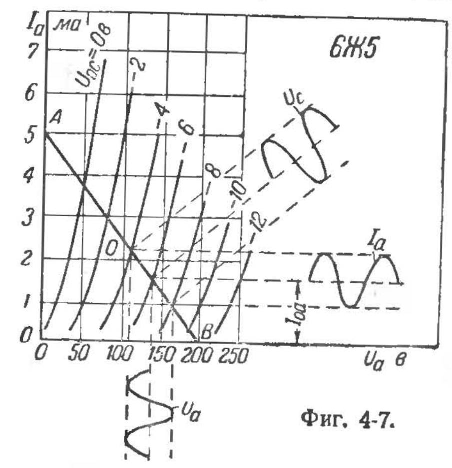
В этом случае изменение анодного тока происходит не по статическим, а по так называемым динамическим характеристикам (фиг. 4-6). Динамические сеточные характеристики (фиг. 4-6,*а*) могут быть построены по уравнению (4-15) или по динамическим анодным характеристикам. Для этого, пользуясь семейством статических анодных характеристик, необходимо построить динамические анодные характеристики при различных значениях анодного нагрузочного сопротивления.



Фиг. 4-6.

Динамические анодные характеристики (фиг. 4-6,*б*) представляют прямые линии и могут быть пост-

роены, если известны величины анодного нагрузочного сопротивления R_a и напряжения анодного источника тока $U_б$. Для построения на оси U_a откладывается величина $U_б$, а на оси I_a — величина $\frac{U_б}{R_a}$, и через полученные точки проводится прямая линия, которая и будет являться динамической характеристикой для данного значения R_a.



Фиг. 4-7.

Если к сетке лампы, кроме постоянного напряжения U_{0c}, приложено переменное синусоидальное напряжение $u_c = U_c \sin \omega t$ (фиг. 4-7), то при отсутствии анодного нагрузочного сопротивления ($R_a = 0$), $i_a = S u_c$, где S — статическая крутизна характеристики. Амплитуда анодного тока равна

$$I_a = S U_c, \tag{4-16}$$

где U_c — амплитуда переменного напряжения на сетке.

Если в анодную цепь лампы включено активное нагрузочное сопротивление R_a, то амплитуда переменной составляющей анодного напряжения

$$U_a = I_a R_a. \tag{4-17}$$

Амплитуда переменной составляющей результирующего сеточного напряжения равна

$$U_{c\,рез} = U_c - \frac{U_a}{\mu}, \tag{4-18}$$

где μ — коэффициент усиления (статический).

Амплитуда анодного тока равна

$$I_a = \frac{\mu U_c}{R_i + R}, \tag{4-19}$$

где R — внутреннее сопротивление лампы переменному току.

Динамический коэффициент усиления лампы или коэффициент усиления каскада равен

$$K = \frac{U_a}{U_c} = \frac{\mu}{1 + \frac{R_i}{R_a}} = \frac{\mu R_a}{R_i + R_a}. \tag{4-20}$$

В случае, когда анодное нагрузочное сопротивление не является чисто активным, его обозначают Z_a и складывают с R_i геометрически.

Каждая усилительная лампа при работе в прямолинейной части характеристики может быть заменена эквивалентным генератором переменного тока с э. д. с. μU_c и внутренним сопротивлением R_i, включенным последовательно с нагрузочным сопротивлением R_a.

Амплитуда переменной составляющей анодного тока вычисляется по формуле (4-19), которая может быть также представлена в виде

$$I_a = S_д U_c, \tag{4-21}$$

где $S_д$ — динамическая крутизна характеристики, равная

$$S_д = \frac{R_i S}{R_i + R_a}. \tag{4-22}$$

Наибольший возможный коэффициент усиления каскада [как следует из формулы (4-20), если R_a во много раз больше внутреннего сопротивления лампы R_i] $K = \mu$, т. е. равен статическому коэффициенту усиления лампы.

Коэффициент усиления каскада с триодом не увеличивается значительно, если R_a будет выбрано больше, чем $4R_i$.

Для многоэлектродных ламп обычно берут R_a намного меньше, чем R_i. В этом случае коэффициент усиления каскада может быть подсчитан приближенно по формуле

$$K \approx S R_a, \tag{4-22а}$$

где S — статическая крутизна лампы.

Примеры и задачи.

4-10. Анодная цепь усилительной лампы нагружена омическим сопротивлением $R_a = 0{,}25$ *мгом*. Чему должно быть равно напряжение анодного источника, чтобы анодное напряжение U_{0a} при анодном токе $I_{0a} = 0{,}5$ *ма* равнялось 150 *в*?

Решение.

$$U_б = U_{0a} + I_{0a}R_a = 150 + 0{,}0005 \cdot 250\,000 = 150 + 125 = 275 \text{ в}.$$

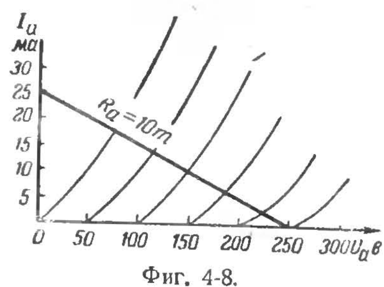
4-11. Анодное нагрузочное сопротивление усилительной лампы $R_a = 10\,000$ *ом*. Напряжение выпрямителя $U_б = 250$ *в*. Построить анодную динамическую характеристику.

Решение. Начальная точка характеристики ($I_a = 0$) лежит на оси U_a в точке, соответствующей 250 *в*. Конечная точка характеристики ($U_a = 0$) лежит на оси I_a в точке, определяемой по величине анодного тока из формулы (4-15):

$$I_a = \frac{250}{10\,000}\, 0{,}025\, a = 25 \text{ ма}.$$

Характеристика имеет вид, указанный на фиг. 4-8.

4-12. Динамическая характеристика усилительной лампы, нагруженной анодным сопротивлением R_a, пересекает ось I_a в точке, соответствующей 2 *ма*. Определить R_a, если напряжение анодной батареи $U_б = 250$ *в*.



Фиг. 4-8.

Ответ: $R_a = 125\,000$ *ом*.

4-13. В анодной цепи трехэлектродной лампы включено сопротивление 0,2 *мгом*. Напряжение выпрямителя — 300 *в*, анодный ток покоя равен 0,8 *ма*. Определить: а) начальное анодное напряжение; б) амплитуду переменной составляющей анодного напряжения, если переменная составляющая анодного тока равна 0,4 *ма*.

Ответ: а) 140 *в*; б) 80 *в*.

4-14. Оконечная лампа нагружена на чисто индуктивное сопротивление в 2 500 *ом*; напряжение выпрямителя — 250 *в*, анодный ток покоя равен 60 *ма*. Определить: а) постоянную составляющую анодного напряжения; б) амплитуду переменной составляющей анодного тока, если амплитуда переменной составляющей анодного напряжения равна 125 *в*; в) максимальное и минимальное значения анодного тока.

Решение. а) Постоянная составляющая анодного напряжения равна напряжению выпрямителя, т. е. 250 *в*, так как в анодную цепь включено чисто индуктивное сопротивление, на котором падение постоянного напряжения отсутствует. б) Амплитуда переменной составляющей анодного тока равна $\frac{125}{25\,000} = 0{,}05\, a = 50$ *ма*; в) максимальное значение анодного тока равно $60 + 50 = 110$ *ма*, и минимальное значение анодного тока равно $60 - 50 = 10$ *ма*.

4-15. Оконечный пентод имеет в рабочей точке крутизну 9,5 *ма/в* и внутреннее сопротивление 50 000 *ом*. Определить: а) динамическую крутизну при индуктивном нагрузочном сопротивлении 7 000 *ом*; б) амплитуду переменной составляющей анодного тока, если к сетке лампы подведено переменное напряжение с амплитудой 4 *в*; в) амплитуду переменного напряжения в анодной цепи лампы.

Ответ: а) 9,4 *ма/в*; б) 37,6 *ма*; в) 264 *в*.

4-16. Усилительная лампа имеет в рабочей точке внутреннее сопротивление 12 000 *ом* и коэффициент усиления 30 и нагружена на чистую индуктивность 50 *гн*. Определить: а) коэффициент усиления при частоте 800 *гц*; б) статическую крутизну в рабочей точке; в) динамическую крутизну.

Решение

$$Z_a = X_a = \omega L = 6{,}28 \cdot 800 \cdot 50 \approx 5\,000 \cdot 50 = 250\,000 \text{ ом}.$$

По формуле (4-20) с учетом необходимости геометрического сложения R_i и X_a получаем

$$K = \frac{30 \cdot 250\,000}{\sqrt{12\,000^2 + 250\,000^2}} \approx 30.$$

Далее из формулы (4-14) следует

$$S=\frac{\mu}{R_i}=\frac{30}{12\,000}=0{,}0025\ a/в=2{,}5\ ма/в.$$

Наконец, согласно формуле (4-22) — опять-таки с учетом геометрического сложения — получим

$$S_д=\frac{2{,}5\cdot 12\,000}{25\,000}=0{,}12\ ма/в.$$

Так как значение Z_a зависит от частоты f, то вычисленные значения K и $S_д$ верны только для данной частоты $f=800$ *гц*.

4-17. Лампа 6С2 (6Ж5) имеет в рабочей точке коэффициент усиления $\mu=20$ и внутреннее сопротивление $R_i=7\,000$ *ом*. Определить: а) величину сопротивления нагрузки, при которой получается восьмикратное усиление напряжения; б) динамическую крутизну.

Ответ: а) 5 130 *ом*; б) 1,56 *ма/в*.

4-18. Пентод 6К7Б (6К7) имеет в рабочей точке статическую крутизну $S=1{,}45$ *ма/в* и внутреннее сопротивление $R_i=827\,000$ *ом*. Определить: а) статический коэффициент усиления; б) коэффициент усиления каскада, если в анодную цепь лампы включен настроенный в резонанс контур, имеющий индуктивность $L=0{,}1$ *мгн*, емкость $C=44$ *мкмкф* и сопротивление потерь $R=20$ *ом*.

Ответ: а) 1 200; б) 145.

2. ОБЩИЙ КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ УСИЛИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

Коэффициент усиления усилительного устройства, состоящего из нескольких каскадов (или нескольких усилителей), определяется по формуле

$$K=\frac{U_{вых}}{U_{вх}}=K_1\cdot K_2\cdot K_3\ldots K_n, \qquad (4\text{-}23)$$

где K_1, K_2, K_3 и т. д. — коэффициенты усиления первого, второго, третьего и т. д. каскадов (усилителей).

Примеры и задачи.

4-19. С кристаллического детектора на вход двухкаскадного усилителя низкой частоты подается напряжение 0,05 *в*. Коэффициент усиления каждого каскада равен 15. Усиленное напряжение подается на оконечный усилитель, коэффициент усиления которого равен трем. Определить общий коэффициент усиления и напряжение на выходе последнего каскада.

Решение. $K=K_1\cdot K_2\cdot K_3=15\cdot 15\cdot 3=675$; $U_{вых}=KU_{вх}=675\cdot 0{,}05=33{,}75$ *в*.

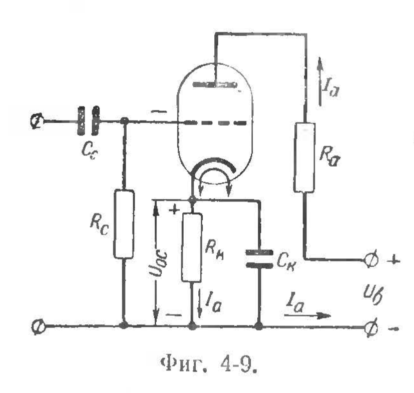
4-19а. Полный коэффициент усиления усилительного устройства $K=1\,000$. Определить: а) входное напряжение усилителя, если выходное напряжение равно 10 *в*.

Ответ: $U_{вх}=0{,}01$ *в* $=10$ *мв*.

3. УСИЛИТЕЛИ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ

Усилитель низкой частоты на сопротивлениях. Для средней частоты коэффициент усиления усилительного каскада на сопротивлениях (фиг. 4-9) равен

$$K=\frac{\mu R_a}{R_i+R_a}=\frac{\mu}{1+\frac{R_i}{R_a}}=S_д R_a. \qquad (4\text{-}24)$$



Фиг. 4-9.

Сопротивление $R_к$, включенное в провод катода лампы для получения автоматического смещения, определяется по формуле

$$R_к=\frac{U_{0c}}{I_0}, \qquad (4\text{-}25)$$

где U_{0c} — необходимое смещение на сетке лампы, *в*;
I_0 — ток, проходящий через сопротивление $R_к$, *а*.

Ёмкость $C_к$, шунтирующая $R_к$, выбирается для усиления колебаний с частотой от 30 *гц* и выше по формуле

$$C_к \approx \frac{53\,000}{R_к} \text{ мкф}, \qquad (4\text{-}26а)$$

а для усиления колебаний с частотой от 50—60 *гц* и выше

$$C_к \approx \frac{25\,000}{R_к} \text{ мкф}. \qquad (4\text{-}26б)$$

Если данный каскад связан с последующим каскадом (фиг. 4-10), то коэффициент усиления каскада на средних частотах приближенно определяется по формуле (4-24). Для более точного расчета в этой формуле надо вместо R_a брать действующее в анодной цепи нагрузочное сопротивление $R'_a = \frac{R_a R_c}{R_a + R_c}$.

Чтобы коэффициент усиления каскада на самой низкой частоте $\omega_н$ уменьшался не более чем на 30% по сравнению с усилением на средних частотах, необходимо брать

$$C_c \geqslant \frac{10^6}{\omega_н R_a} \text{ мкф}. \qquad (4\text{-}27)$$

Чтобы коэффициент усиления каскада на самой низкой частоте $\omega_н$ уменьшался не более чем на 5%, по сравнению с усилением на средних частотах, необходимо чтобы

$$C_c \geqslant \frac{3 \cdot 10^6}{\omega_н R_c} \text{ мкф}. \qquad (4\text{-}28)$$

Верхняя граница усиливаемой полосы частот определяется емкостью, шунтирующей анодное нагрузочное сопротивление. Эта емкость для триодов (фиг. 4-10) определяется формулой

$$C_ш = C_о + C_{ск} + C_{ак} + C_{са}(1+K), \qquad (4\text{-}29)$$

где $C_о$ — емкость монтажа, т. е. емкость проводов анода и сетки относительно катода (на схеме не показана);

$C_{ск}$ и $C_{са}$ — емкости сетка — катод и сетка — анод последующей лампы;

$C_{ак}$ — емкость анод — катод предыдущей лампы;

K — коэффициент усиления последующего каскада.

Для пентодов

$$C_ш \approx C_о + C_{ск} + C_{сэ} + C_{ак}, \qquad (4\text{-}29а)$$

где все обозначения — прежние, а $C_{сэ}$ — емкость управляющая сетка — экранирующая сетка последующего каскада.

Чтобы коэффициент усиления каскада на самой высокой частоте $\omega_в$ уменьшался не более чем на 30% по сравнению с усилением на средних частотах, необходимо, чтобы

$$R \leqslant \frac{1}{\omega C_ш} \text{ ом}, \qquad (4\text{-}30)$$

где

$$R = \frac{1}{\frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_c}} \qquad (4\text{-}31)$$

или приближенно, пренебрегая величиной $\frac{1}{R_c}$,

$$R \approx \frac{R_a R_i}{R_a + R_i} = R'_a. \qquad (4\text{-}31а)$$

Чтобы коэффициент усиления каскада на самой высшей частоте уменьшался не более чем на 5% по сравнению с усилением на средних частотах, необходимо, чтобы

$$R \leqslant \frac{1}{3\omega_в C_ш} \text{ ом}. \qquad (4\text{-}32)$$

В случае пентода сопротивление в цепи экранирующей сетки определяется по формуле

$$R_э = \frac{U_б - U_{0ш}}{I_{0э}}, \qquad (4\text{-}33)$$

где $U_{0э}$ — постоянное напряжение на экранирующей сетке и $I_{0э}$ — постоянная составляющая тока экранирующей сетки.

Блокирующая емкость в цепи экранирующей сетки определяется формулой

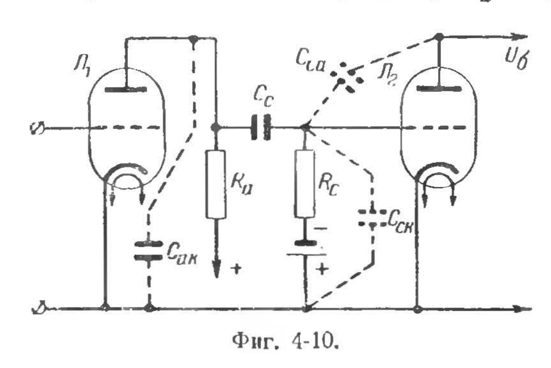
$$C_э \geqslant \frac{50\cdot 10^6}{\omega_н R_э} \text{ мкф.} \qquad (4\text{-}34)$$

Примеры и задачи.

4-20. Анодный ток пентода в рабочем режиме равен $I_{0a} = 36$ *ма* и ток экранирующей сетки $I_{0э} = 5$ *ма*. Определить величину катодного сопротивления $R_к$, необходимого для получения на управляющей сетке смещения $U_{0c} = -6$ *в*.

Ответ: $R_к = 146$ *ом*.

4-20а. Каскад усиления н. ч. собран на лампе 6С4Б (фиг. 4-9). Напряжение анодной батареи (выпрямителя) — 250 *в*; анодный ток — 0,25 *ма*; $R_a = 0,2$ *мгом*.



Фиг. 4-10.

Определить: а) величину катодного сопротивления, необходимого для получения автоматического смещения (—2) *в*; б) величину анодного напряжения.

Ответ: а) 8 000 *ом*; б) 200 *в*.

4-21. Усилительный каскад собран на лампе 6С5Б (фиг. 4-10) и имеет следующие данные: внутреннее сопротивление лампы $R_i = 10\,000$ *ом*; анодное нагрузочное сопротивление $R_a = 0,1$ *мгом*; коэффициент усиления $\mu = 20$; сопротивление утечки $R_c = 1$ *мгом*. Допустимое уменьшение усиления на крайних частотах—30%.

Определить: а) коэффициент усиления каскада K; б) емкость конденсатора C_c, если самая низкая усиливаемая частота $f_н = 30$ *гц*; в) максимальную допустимую шунтирующую емкость $C_ш$, если наивысшая усиливаемая частота $f_в = 10\,000$ *гц*; г) емкость конденсатора $C_к$, шунтирующего катодное сопротивление $R_к = 3\,000$ *ом*.

Решение.

а) $R_a' = \frac{10^6\cdot 10^5}{10^6 + 10^5} \approx 9,1\cdot 10^4$ *ом*;

$$K = \frac{20}{1 + \frac{10^4}{9,1\cdot 10^4}} \approx 18;$$

б) $C_c \geqslant \frac{10^6}{\omega_н R_c} = \frac{10^6}{2\pi\cdot 30\cdot 10^6} = \frac{1}{60\cdot\pi}$ *мкф* $= \frac{10^6}{60\,\pi}$ *мкмкф* $=$

$= 5\,300$ *мкмкф*.

в) Из формулы (4-30) следует: $C_ш = \frac{1}{\omega_в R}$, где, согласно формуле 4-31а, $R = \frac{10^4\cdot 10^5}{10^4 + 10^5} = 9,1\cdot 10^3$.

Тогда

$$C_ш = \frac{1}{2\pi\cdot 10\,000\cdot 9\,100} = \frac{10^{-6}}{2\pi\cdot 91} \approx 0,00175\ 10^{-6} ф = 1\,750 \text{ мкмкф}.$$

г) Из формулы (4-26а) следует: $C_к = \frac{53\,000}{3\,000} \approx 18$ *мкф*.

4-21а. Наивысшая частота усиливаемого напряжения $f_в = 16\,000$ *гц*; коэффициент усиления каскада с триодом на этой частоте по сравнению с усилением на средних частотах не должен уменьшаться больше, чем на 5%. Определить: а) шунтирующую емкость $C_ш$, если емкость монтажа $C_0 = 20$ *мкмкф*, $C_{ск} = 5$ *мкмкф*, $C_{ак} = 4,5$ *мкмкф*, $C_{са} = 1,7$ *мкмкф*, а коэффициент усиления последующего каскада $K = 20$; б) какое наибольшее значение может иметь анодное нагрузочное сопротивление R_a, если сопротивление утечки следующего каскада $R_c = 0,8$ *мгом* и внутреннее сопротивление лампы $R_i = 0,1$ *мгом*.

Ответ: а) $C_ш = 65,2$ *мкмкф*;

б) $R_a \approx 115\,000$ *ом*.

4-22. Усилительный триод работает в усилителе низкой частоты на сопротивлениях (фиг. 4-10) при следующих условиях: напряжение батареи $U_б = 120$ *в*, $\mu = 25$, $I_{0a} = 0,2$ *ма*, $R_a = 0,1$ *мгом*, $R_i = 80\,000$ *ом*. Определить: а) коэффициент усиления каскада K; б) динамическую крутизну $S_д$; в) емкость C_c сеточного конденсатора, если $R_c = 1,5$ *мгом* и если уменьшение усиления на частоте 30 *гц* не должно превышать 30%.

Ответ: а) $K = 13,5$; б) $S_д = 0,144$ *ма/в*;

в) $C_c \approx 3\,300$ *мкмкф*.

4-23. Усилительный каскад на пентоде 6Ж7Б имеет $R_i = 1$ *мгом*, $R_a = 0,2$ *мгом* и должен пропустить полосу частот от 60 до 8 000 *гц*. Определить: а) сопротивление утечки в цепи сетки следующего каскада, если шунтирующая емкость равна 50 *мкмкф* и уменьшение усиления на крайних частотах не должно превышать 5%; б) емкость переходного конденсатора.

Ответ: а) 0,67 *мгом*; б) 12 000 *мкмкф*.

4-24. Определить данные схемы и режим работы без значительных искажений для усилительного каскада предыдущей задачи, если известно, что напряжение выпрямителя равно 250 *в*, смещение на управляющей сетке равно (—4) *в* и напряжение на экранирующей сетке равно 100 *в*.

Решение. Из предыдущей задачи известно, что действующее нагрузочное сопротивление в анодной цепи равно $1,33 \cdot 10^5$ *ом*. Пользуясь семейством анодных характеристик лампы 6Ж7Б (Гурфинкель, Приемно-усилительные лампы, Госэнергоиздат, 1949), строим динамическую характеристику, по которой определяем $I_{0a} \approx 0,8$ *ма*. Считаем, что ток экранирующей сетки равен приблизительно $0,25\, I_{0a} = 0,2$ *ма*. Крутизна равна 1,2 *ма/в*.

Коэффициент усиления каскада согласно формуле (4-20а) приближенно равен

$$K = SR'_a = 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 1,33 \cdot 10^5 \approx 160.$$

Чтобы искажения были незначительны, амплитуда напряжения на сетке U_c, как видно из характеристики, не должна быть больше 0,5 *в*; следовательно, на выходе можно получить амплитуду напряжения 80 *в*.

Сопротивление в цепи катода должно быть

$$R_к = \frac{4}{(0,8 + 0,2) \cdot 10^{-3}} = 4\,000 \text{ ом}.$$

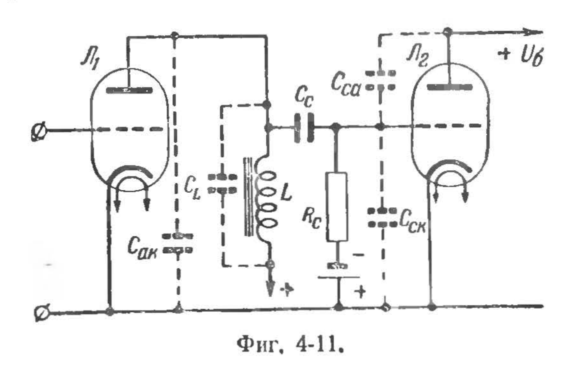
Сопротивление в цепи экранирующей сетки $R_э = \frac{250 - 100}{0,2 \cdot 10^{-3}} = 750\,000$ *ом*.

Емкость $C_к = \frac{25\,000}{4\,000} \approx 6$ *мкф*.

Блокирующая емкость в цепи экранирующей сетки равна

$$C_э \geqslant \frac{50 \cdot 10^6}{6,28 \cdot 60 \cdot 750\,000} = 0,175 \text{ мкф}.$$

Усилители низкой частоты на дросселях. Коэффициент усиления усилительного каскада на дросселе



Фиг. 4-11.

(фиг. 4-11) можно вычислить приближенно по формуле

$$K \approx \mu \sqrt{\frac{R^2 + (\omega L)^2}{(R_i + R)^2 + (\omega L)^2}}, \tag{4-35}$$

где R — активное сопротивление дросселя;

ωL — индуктивное сопротивление дросселя;

R_i — внутреннее сопротивление лампы.

Если активное сопротивление дросселя мало по сравнению с его индуктивным сопротивлением, то

$$K \approx \frac{\mu \omega L}{\sqrt{R_i^2 + (\omega L)^2}}. \tag{4-36}$$

Формулы (4-35) и (4-36) не учитывают шунтирующего влияния R_c следующего каскада.

Если емкость конденсатора C_c (фиг. 4-11) выбрана достаточно большой, то нижняя граница частоты усиливаемого напряжения, внутреннее сопротивление лампы и индуктивность дросселя связаны соотношением $R_i = \omega_н L$.

Верхняя граница частоты усиливаемого напряжения определяется шунтирующей емкостью $C'_ш$, которая отличается от величины $C_ш$ для усилителя на сопротивлениях тем, что к ней прибавляется собственная емкость дросселя C_L.

Резонансная частота дросселя определится как

$$f_p \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC'_ш}}. \qquad (4\text{-}37)$$

На этой частоте усиление каскада будет наибольшим.

Задача.

4-25. Каскад усиления на дросселе работает с лампой, имеющей внутреннее сопротивление 50 000 *ом*. Определить: а) необходимую минимальную индуктивность дросселя, если наименьшая усиливаемая частота $f_н = 50$ *гц*; б) резонансную частоту дросселя, если шунтирующая емкость $C'_ш = 30$ *мкмкф*; в) коэффициент усиления каскада на частоте 1 000 *гц*, если коэффициент усиления лампы равен 100.

Ответ: а) 159 *гн*; б) 2 300 *гц*; в) ≈ 100.

Усилители низкой частоты на трансформаторах. В общем случае коэффициент усиления каскада на трансформаторе (фиг. 4-12) определяется как

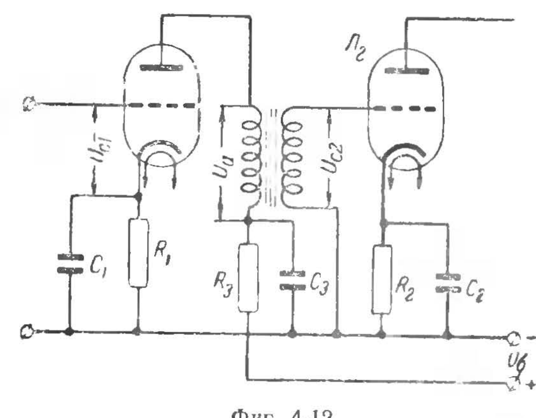
$$K = \frac{U_{c2}}{U_{c1}} = n\frac{U_a}{U_{c1}}, \qquad (4\text{-}38)$$

где $n = \frac{w_2}{w_1}$ — коэффициент трансформации.

Для низших частот (до 800 *гц*) при применении в качестве усилительной лампы триода коэффициент усиления каскада определяется по формуле

$$K_н \approx n\mu\frac{\omega L_1}{\sqrt{R_i^2 + (\omega L_1)^2}}, \qquad (4\text{-}39)$$

где L_1 — индуктивность первичной обмотки трансформатора. В этой формуле и далее активное сопротивление первичной обмотки не учитывается.



Фиг. 4-12.

Нижняя граница частоты усиливаемого напряжения для усилителя на трансформаторе определяется условием

$$R_i \leqslant \omega_н L_1. \qquad (4\text{-}40)$$

Верхняя граница частоты усиливаемого напряжения зависит от величины емкости, вносимой из вторичной цепи в первичную, и определяется соотношением

$$R_i \leqslant \frac{1}{\omega_в C_{вн}}. \qquad (4\text{-}41)$$

Индуктивность рассеяния $L_{рас}$ трансформатора и вносимая емкость $C_{вн}$ определяют резонансную частоту эквивалентного последовательного контура $L_{рас}$, $C_{вн}$:

$$\omega_{рас} = \frac{1}{\sqrt{L_{рас}C_{вн}}}, \qquad (4\text{-}42)$$

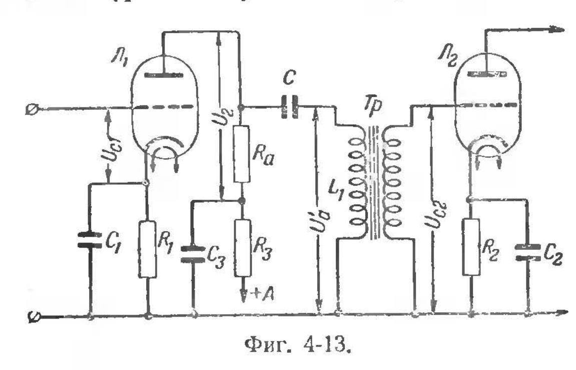
где согласно формуле (3-4д) $L_{рас} \approx L_1(1 - k^2) = L_1\sigma$ (здесь k—коэффициент связи между обмотками трансформатора; σ — коэффициент рассеяния). Согласно формуле (3-3), вносимая емкость $C_{вн} = C_ш n^2$, где $C_ш$ — емкость, на которую нагружена вторичная обмотка трансформатора, равная сумме собственной емкости вторичной обмотки и входной емкости следующего каскада.

Коэффициент усиления на частоте $\omega_{рас}$

$$K_{рас} = \frac{n\mu}{R_i \omega_{рас} C_{вн}} = \frac{n\mu\omega_{рас} L_1\sigma}{R_i}, \qquad (4\text{-}43)$$

где $n\mu = K_{ср}$ — коэффициент усиления на средних частотах.

В случае применения схемы с параллельным анодным питанием (фиг. 4-13) на некоторой низшей частоте



Фиг. 4-13.

наблюдается резонанс напряжений в первичной цепи трансформатора, и эта резонансная частота равна

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{L_1 C}}. \qquad (4\text{-}44)$$

Коэффициент усиления на этой резонансной частоте определяется формулой

$$K_p = n\mu \frac{\omega_p L_1}{R_i}, \qquad (4\text{-}45)$$

а коэффициент усиления на средних частотах равен

$$K_{ср} = \frac{n\mu R_a}{R_i + R_a}$$

или при $R_a \gg R_i$ получаем

$$K_{ср} = n\mu.$$

Формула (4-43) остается в силе и для данной схемы.

Если для схемы фиг. 4-13 резонансную частоту ω_p первичной цепи трансформатора сделать равной низшей частоте усиливаемых напряжений, а резонансную частоту рассеяния $\omega_{рас}$ сделать равной высшей частоте, то между этими частотами усиление будет приблизительно равномерно и равно коэффициенту усиления на средних частотах $K_{ср}$.

Усиление на крайних частотах зависит от добротности контуров L_1, C и $L_{рас}$, $C_{вн}$.

Добротность контура L_1, C на частоте ω_p определяется формулой

$$Q_н = \frac{\omega_p L_1}{R_i}, \qquad (4\text{-}46)$$

а коэффициент усиления

$$K_н = n\mu Q_н. \qquad (4\text{-}47)$$

Добротность контура $L_{рас}$, $C_{вн}$ на частоте $\omega_{рас}$ определяется формулой

$$Q_в = \frac{\omega_{рас}\sigma L_1}{R_i} \qquad (4\text{-}48)$$

и коэффициент усиления

$$K_в = n\mu Q_в. \qquad (4\text{-}49)$$

Для получения $K_н = K_в = K_{ср}$ необходимо параметры схемы выбирать так, чтобы

$$Q_н = Q_в = 1,$$

что приводит к соотношению

$$\frac{\omega_p}{\omega_{рас}} = \frac{f_p}{f_{рас}} = \frac{f_н}{f_в} = \sigma. \qquad (4\text{-}50)$$

Примеры и задачи.

4-26. Двухкаскадный усилитель низкой частоты на трансформаторах (фиг. 4-12) работает на двух триодах 6С5Б с внутренним сопротивлением 10 000 *ом* и коэффициентом усиления 20 для каждого триода.

Определить общее усиление на частоте 50 *гц*, если коэффициент трансформации каждого трансформатора равен трем, а индуктивность первичных обмоток у каждого из них равна 80 *гн*.

Ответ: $K = 31\,000$.

4-27. Усилительный каскад по схеме фиг. 4-13 имеет следующие данные:

$\mu = 30$; $R_i = 20\,000$ *ом*; $n = 3$; $L_1 = 100$ *гн*;
$R_a = 100\,000$ *ом*; $C = 0{,}1$ *мкф*.

Определить: а) нижнюю резонансную частоту $f_н$; б) коэффициент усиления на этой частоте $K_н$.

Ответ: а) 50 *гц*; б) 141.

4-28. Наименьшая и наибольшая частоты полосы пропускания усилителя по схеме фиг. 4-12 при применении лампы, имеющей $R_i = 15\,000$ *ом*, соответственно равны 30 и 12 000 *гц*. Определить: а) минимальную индуктивность первичной обмотки трансформатора; б) величину емкости, на которую нагружена вторичная обмотка трансформатора, если $n = 3$.

Решение.

а) $$L_1 = \frac{R_i}{2\pi f_н} = \frac{15\,000}{2\pi \cdot 30} \approx 80 \text{ гн};$$

б) $$C_{вн} = \frac{1}{2\pi f_в R_i} = \frac{1}{2\pi \cdot 12\,000 \cdot 15\,000} = 8{,}9 \cdot 10^{-10} \text{ ф} = 890 \text{ мкмкф}.$$

Тогда

$$C_ш = \frac{C_{вн}}{n^2} = \frac{890}{9} = 99 \text{ мкмкф}.$$

4-29. Каскад с трансформатором работает на лампе 6С5Б, имеющей $R_i = 10\,000$ *ом* и $\mu = 20$. Междуламповый трансформатор имеет следующие данные: $n = 2$; $L_1 = 80$ *гн* и коэффициент рассеяния 1%.

Резонансная частота рассеяния $f_{рас} = f_в$ равна 12 000 *гц*.

Определить: а) допустимую величину шунтирующей емкости во вторичной цепи трансформатора; б) коэффициент усиления при частоте $f_{рас}$.

Решение.

а) $$C_ш = \frac{1}{\omega_{рас}^2 \sigma L_1 n^2} = \frac{1}{(2\pi \cdot 1{,}2 \cdot 10^4)^2 \cdot 0{,}01 \cdot 80 \cdot 4} =$$
$$= 5{,}4 \cdot 10^{-11} \text{ ф} = 54 \text{ мкмкф};$$

б) $$K_{рас} = \frac{2 \cdot 20 \cdot 2\pi \cdot 12\,000 \cdot 0{,}01 \cdot 80}{10\,000} = 240.$$

4-30. Усилитель с трансформатором по схеме фиг. 4-13 должен равномерно усиливать частоты от 50 до 10 000 *гц*. Определить: а) какой должен быть коэффициент рассеяния трансформатора; б) минимальную величину внутреннего сопротивления лампы при индуктивности первичной обмотки трансформатора 60 *гн*; в) величину коэффициента трансформации, если емкость во вторичной цепи трансформатора равна 50 *мкмкф*.

Решение.

а) $$\sigma = \frac{f_н}{f_в} = \frac{50}{10\,000} = 0{,}005 = 0{,}5\%;$$

б) из условия $Q_н = 1$ следует:

$$R_i = \omega_н L_1 = 2\pi \cdot 50 \cdot 60 = 6\,000\pi = 18\,850 \text{ ом};$$

в) $$R_i = \frac{1}{\omega_в C_ш n^2} \text{ или}$$

$$n^2 = \frac{1}{R_i \omega_в C_ш} = \frac{10^{12}}{18\,850 \cdot 2\pi \cdot 10\,000 \cdot 50} \approx 16,$$

откуда

$$n = 4.$$

4-31. Триод в усилительном каскаде на трансформаторе имеет внутреннее сопротивление $R_i = 20\,000$ *ом*. Индуктивность первичной обмотки трансформатора $L_1 = 60$ *гн*, а коэффициент рассеяния $\sigma = 0{,}6\%$. Определить: а) индуктивность рассеяния; б) коэффициент связи трансформатора.

Ответ: а) 0,36 *гн*; б) 99,7%.

4-32. Трансформатор низкой частоты включен по схеме фиг. 4-13. При этом на частоте 40 *гц* усиление

должно быть увеличено в три раза по сравнению с усилением на средней частоте. Определить: а) величину емкости C, если индуктивность $L_1 = 80$ *гн*; б) наибольшую допустимую величину R_i лампы.

Ответ: а) 0,2 *мкф*; б) 6 700 *ом*.

4-33. Каскад УНЧ по схеме фиг. 4-13 на лампе 6Н7 должен равномерно усиливать частоты в диапазоне от 80 до 8 000 *гц*. Полная шунтирующая емкость вторичной цепи $C_ш = C_{вх} + C_{монт} + C_{тр} = 50 + 20 + 50 = 120$ *мкмкф*; внутреннее сопротивление лампы $R_i = 16\,000$ *ом* и коэффициент усиления $\mu = 32$. Определить: а) индуктивность первичной обмотки трансформатора; б) коэффициент трансформации; в) индуктивность вторичной обмотки; г) коэффициент усиления каскада.

Решение.

а) Из формулы (4-50) находим коэффициент рассеяния трансформатора

$$\sigma = \frac{80}{8\,000} = 0{,}01 = 1\%.$$

Так как $Q_в = 1$, а $\omega_{рас} = \omega_в = 2\pi f_в = 2\pi \cdot 8\,000 \approx 50\,000$, то из формулы (4-48) находим индуктивность первичной обмотки

$$L_1 = \frac{R_i}{\omega_{рас}\sigma} = \frac{16\,000}{50\,000 \cdot 0{,}01} = 32 \text{ гн}.$$

б) По величине $L_{рас} = \sigma L_1 = 0{,}01 \cdot 32 = 0{,}32$ *гн* из формулы (4-42) находим

$$C_{вн} = \frac{1}{\omega_{рас}^2 L_{рас}} = \frac{1}{50\,000^2 \cdot 0{,}32} = \frac{10^{12}}{25 \cdot 10^8 \cdot 0{,}32} = 1\,250 \text{ мкмкф}.$$

Из соотношения $C_{вн} = C_ш n^2$ получаем $n = \sqrt{\frac{C_{вн}}{C_ш}} = 3{,}22$.

в) Согласно формуле (3-116) индуктивность вторичной обмотки

$$L_2 = n^2 L_1 = 10{,}4 \cdot 32 = 330 \text{ гн}.$$

г) Если взять $R_a \gg R_i$, то коэффициент усиления по всему диапазону равен приближенно коэффициенту усиления на средних частотах: $K \approx n\mu = 3{,}22 \cdot 32 = 103$.

Действительно, согласно формуле (4-43) усиление на наивысшей частоте

$$K_в = K_{рас} = \frac{3{,}22 \cdot 32}{16\,000 \cdot 50\,000 \cdot 1\,250 \cdot 10^{-12}} = 103.$$

Усиление на низшей частоте по формуле (4-45)

$$K_н = \mu n Q_н = 32 \cdot 3{,}22 \frac{500 \cdot 32}{16\,000} \approx 103.$$

Оконечный каскад усиления низкой частоты. При работе оконечного каскада на активное нагрузочное сопротивление R_a отдаваемая лампой мощность переменного тока подсчитывается по формулам

$$P = \frac{U_a I_a}{2} = \frac{U_a^2}{2R_a} = \frac{I_a^2 R_a}{2} \text{ вт}, \quad (4\text{-}51)$$

где U_a и I_a — амплитудные значения, или

$$P = \frac{U_c^2 \mu^2 R_a}{2(R_i + R_a)^2} \text{ вт}. \quad (4\text{-}52)$$

Для случая, когда $R_a = R_i$, лампа отдает максимальную мощность

$$P = \frac{U_c^2 \mu^2}{8R_i}. \quad (4\text{-}53)$$

Если на сопротивлении R_a не происходит заметной потери мощности постоянного анодного тока, то потребляемая оконечным каскадом мощность P_0, отдаваемая полезная мощность P и мощность рассеяния на аноде P_a связаны соотношением

$$P_0 = P_a + P. \quad (4\text{-}54)$$

К. п. д. каскада

$$\eta = \frac{P}{P_0}. \quad (4\text{-}55)$$

Когда коэффициент нелинейных искажений $K_{нл}$ оконечного каскада имеет заметную величину, то полезная мощность подсчитывается по формуле

$$P = \frac{I_1^2 R_a}{2},$$

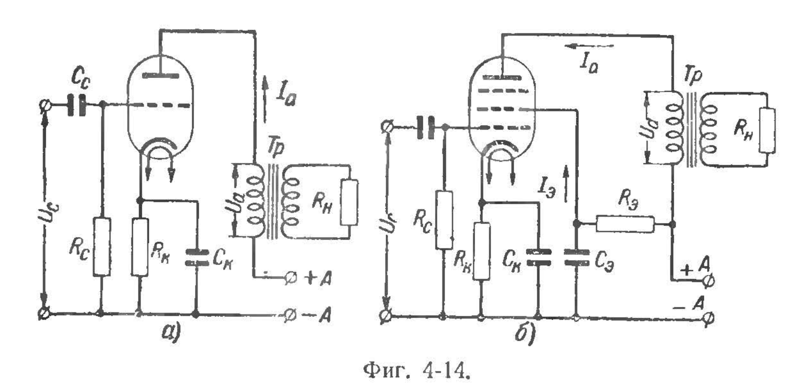
где I_1 — амплитуда первой гармоники анодного тока.

Для триодов, работающих в оконечных каскадах (фиг. 4-14,*а*), сопротивление анодной нагрузки выбирается из расчета

$$R_a = (2-4)R_i. \qquad (4\text{-}56)$$

Для пентодов, работающих в оконечных каскадах (фиг. 4-14,*б*), сопротивление анодной нагрузки выбирается из расчета

$$R_a = (0{,}1-0{,}2)R_i. \qquad (4\text{-}57)$$



Фиг. 4-14.

При работе оконечного каскада на нагрузочное сопротивление $R_н$ (например, на динамик), последнее должно быть согласовано с внутренним сопротивлением лампы с помощью трансформатора, для которого коэффициент трансформации определяется из соотношения

$$R_a = \frac{R_н}{n^2} \quad \text{или} \quad n = \sqrt{\frac{R_н}{R_a}}. \qquad (4\text{-}58)$$

Коэффициент нелинейных искажений для анодного тока определяется по формуле

$$K_{нл} = \frac{\sqrt{I_2^2+I_3^2+I_4^2+\dots}}{I_1}. \qquad (4\text{-}59)$$

где I_1, I_2, I_3 и т. д. — амплитуды первой, второй третьей и т. д. гармоник переменной составляющей анодного тока.

Величины I_1, I_2 и I_3 могут быть определены с помощью сеточной динамической характеристики (фиг. 4-15) и следующих формул:

$$I_1 = \frac{i_3+i_4-(i_1+i_2)}{3}, \qquad (4\text{-}60)$$

$$I_2 = \frac{2i_0-(i_1+i_4)}{4}, \qquad (4\text{-}61)$$

$$I_3 = \frac{2(i_3-i_2)-(i_4-i_1)}{6}, \qquad (4\text{-}62)$$

Фиг. 4-15.

Примеры и задачи.

4-34. Оконечная лампа в схеме фиг. 4-14,*а* нагружена через трансформатор с $n = 1:20$ на активное сопротивление 9 *ом*. Действующее значение переменного анодного напряжения определено измерением и равно $U = 90$ *в*. Определить: а) полезную мощность, развиваемую лампой; б) действующее значение напряжения на нагрузочном сопротивлении.

Решение.

а) Сопротивление нагрузки $R_н$ создает для лампы нагрузочное сопротивление в анодной цепи R_a, которое согласно формуле (4-58) равно $R_a = \frac{R_н}{n^2} = \frac{5}{0{,}05^2} = 2\,000$ *ом*.

Отсюда

$$P = \frac{U^2}{R_a} = \frac{90^2}{2\,000} = 4{,}05 \text{ вт}.$$

б) $U_н = nU = \frac{1}{20}\cdot 90 = 4{,}5$ *в*.

4-35. Триод 6С6, имеющий параметры $\mu = 4{,}2$ и $R_i = 800$ *ом*, отдает мощность 3,5 *вт*. Определить: а) амплитуду переменного напряжения на сетке, если нагрузочное сопротивление в анодной цепи равно 2 500 *ом*; б) какой в этом случае нужно взять коэффициент транс-

формации, если вторичная обмотка выходного трансформатора нагружена на сопротивление 40 *ом*?

Ответ: а) 41,6 *в*; б) 1:8.

4-36. Для повышения отдаваемой мощности в оконечном каскаде, работающем в режиме класса А, включены параллельно два оконечных триода типа 6С6. Определить: а) общую отдаваемую мощность: б) общую потребляемую мощность; в) к. п. д.; г) наивыгоднейшее сопротивление нагрузки.

Решение

Для триода 6С6 имеем: $U_{0a}=250$ *b*; $I_{0d}=60$ *ма*; $P=3,5$ *вт*; $R_i=800$ *ом*; $R_a=2\,500$ *ом*.

а) Так как обе лампы работают параллельно, то

$$P=3,5\cdot 2=7 \text{ вт}.$$

б) аналогично, подводимая мощность

$$P_0=250\cdot 0,06\cdot 2=30 \text{ вт};$$

в) к. п. д. $\eta=\frac{7}{30}=0,233=23,3\%$;

г) поскольку при двух лампах, включенных параллельно,

$$R_i'=\frac{800}{2}=400 \text{ ом, то } R_a=\frac{2\,500}{2}=1\,250 \text{ ом}.$$

4-37. Искаженное переменное напряжение имеет амплитуду первой гармоники $U_1=120$ *в*, второй $U_2=45$ *в*, третьей $U_3=10$ *в* и четвертой $U_4=2$ *в*. Определить коэффициент искажений.

Ответ: 38,5%.

4-38. Оконечный каскад работает с искажениями. Амплитуда первой гармоники равна $I_1=28$ *ма*. Определить отдаваемую каскадом мощность, если сопротивление нагрузки $R_a=5\,000$ *ом*.

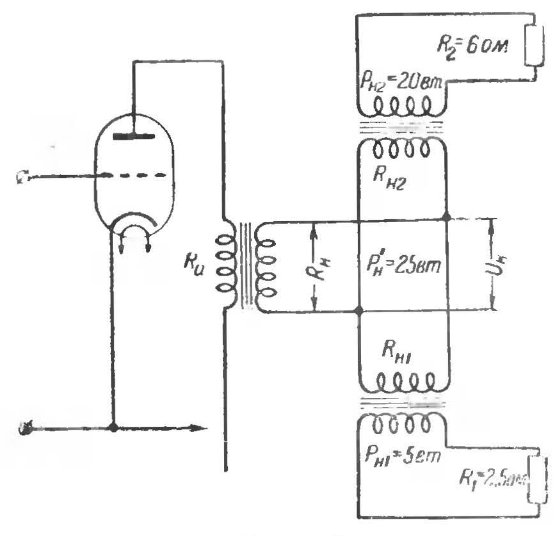
Ответ: $P\approx 2$ *вт*.

4-39. Амплитуда первой гармоники анодного тока оконечного каскада $I_1=30$ *ма*. Определить: а) амплитуду переменного напряжения на аноде, если действующее анодное нагрузочное сопротивление $R_a=7\,000$ *ом*;

б) коэффициент усиления каскада K, если амплитуда переменного напряжения на сетке $U_c=4,5$ *в*.

Ответ: а) 210 *в*; 46,7.

4-40. Оконечный каскад при максимальном переменном напряжении на сетке развивает мощность 4 *вт*.



Фиг. 4-16.

Определить величину мощности, если для уменьшения нелинейных искажений на сетку лампы подано вдвое меньшее напряжение.

Ответ: 1 *вт*.

4-41. Оконечный усилитель, отдающий мощность $P_н=25$ *вт*, работает одновременно на два динамика (фиг. 4-16). Мощность первого динамика $P_1=5$ *вт* и сопротивление звуковой катушки $R_{к1}=2,5$ *ом*, второго — соответственно $P_{н2}=20$ *вт* и $R_2=6$ *ом*. Оба динамика подключены через отдельные трансформаторы к выходному трансформатору усилителя, рассчитанному на нагрузочное сопротивление $R_н=200$ *ом*. Определить:

а) какое нагрузочное сопротивление должен пред-

ставлять со стороны первичной обмотки каждый трансформатор динамика; б) коэффициент трансформации этих трансформаторов.

Решение.

$$а)\ R_{н1}=\frac{P_н}{P_{н1}}R_н=\frac{25}{5}200=1\,000\ ом$$

и

$$R_{н2}=\frac{P_н}{P_{н2}}R_н=\frac{25}{20}\cdot 200=250\ ом.$$

Проверка:

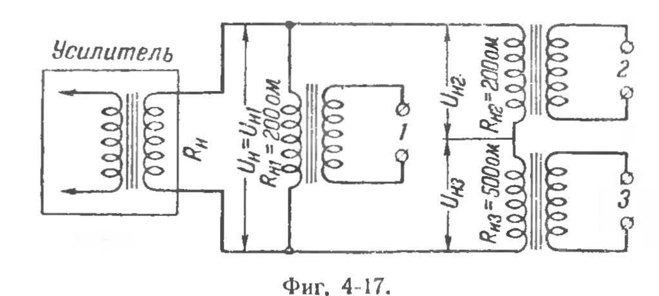
$$R_н=\frac{R_{н1}R_{н2}}{R_{н1}+R_{н2}}=\frac{1\,000\cdot 250}{1\,000+250}=\frac{250\,000}{1\,250}=200\ ом.$$

$$б)\ n_1=\sqrt{\frac{R_1}{R_{н1}}}=\sqrt{\frac{2,5}{1\,000}}=0,05=1:20;$$

$$n_2=\sqrt{\frac{R_2}{R_{н2}}}=\sqrt{\frac{6}{250}}=\frac{2,45}{15,8}=0,155=1:6,45.$$

4-42. К выходному трансформатору оконечного усилителя, отдающего мощность 18 *вт*, подключены параллельно четыре динамических громкоговорителя, у которых согласующие трансформаторы имеют соответственно следующие входные сопротивления: 900, 2 250, 3 000 и 9 000 *ом*. Определить: а) нагрузочное сопротивление усилителя; б) какая мощность приходится на каждый динамик?

Ответ: а) $R_н=500$ *ом*; б) 10; 4; 3 и 1 *вт*.



Фиг. 4-17.

4-43. К усилителю с выходной мощностью 25 *вт* подключены три динамика согласно фиг. 4-17. Определить: а) нагрузочное сопротивление усилителя; б) напряжение на вторичной обмотке выходного трансформатора; в) мощность отдельных динамиков.

Решение.

а) $R_{н2,3}=R_{н2}+R_{н3}=700\ ом;$

$$R_н=\frac{R_{н2,3}\cdot R_{н1}}{R_{н2,3}+R_{н1}}=\frac{700\cdot 200}{700+200}=156\ ом;$$

$$б)\ P_н=\frac{U_н^2}{R_н},$$

откуда

$$U_н=U_{н1}=\sqrt{P_н R_н}=\sqrt{25\cdot 156}=62,5\ в.$$

Напряжения на динамиках *2* и *3*:

$$U_{н2}=\frac{200}{700}\cdot 62,5=17,8\ в;$$

$$U_{н3}=\frac{500}{700}\cdot 62,5=44,5\ в.$$

Следовательно,

$$P_{н1}=\frac{U_{н1}^2}{R_{н1}}=\frac{62,5^2}{200}=19,5\ вт;$$

$$P_{н2}=\frac{U_{н2}^2}{R_{н2}}=\frac{17,8^2}{200}=1,55\ вт;$$

$$P_{н3}=\frac{U_{н3}^2}{R_{н3}}=\frac{44,6^2}{500}=3,95\ вт.$$

4-44. При работе в классе А нагрузочное сопротивление оконечного триода $R_a=2\,300$ *ом*, а активное сопротивление звуковой катушки динамика $R_{дин}=R_н=10$ *ом*. Определить коэффициент трансформации в случаях: а) простого оконечного каскада на триоде; б) при параллельном включении двух триодов; в) при двухтактной схеме на тех же триодах.

Решение

а) для простого оконечного каскада

$$n=\sqrt{\frac{R_н}{R_a}}=\sqrt{\frac{10}{2\,300}}=0{,}066=1:15{,}2;$$

б) при параллельном включении двух триодов

$$R'_a=\frac{R_a}{2}=1\,150 \text{ ом};$$

следовательно,

$$n=\sqrt{\frac{R_н}{R'_a}}=\sqrt{\frac{10}{1\,150}}=0{,}0935=1:10{,}7;$$

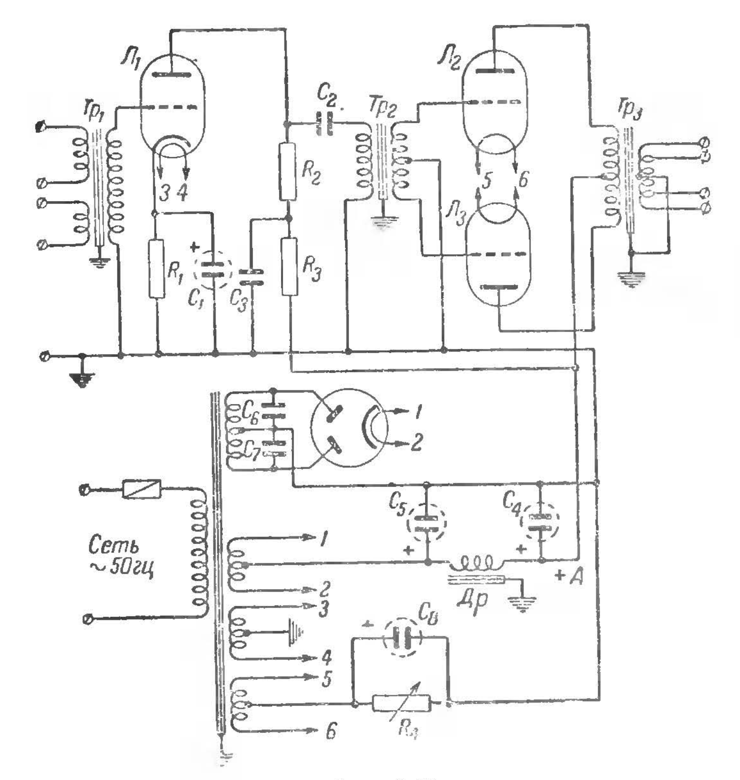
в) при двухтактной схеме $R''_a=2R_a=4\,600$ *ом*; следовательно,

$$n=\sqrt{\frac{R_н}{R''_a}}=\sqrt{\frac{10}{4\,600}}=0{,}0465=1:21{,}4.$$

4-45. Постоянные составляющие анодного тока ламп в усилителе по схеме (фиг. 4-18) соответственно равны: $I_{01}=2{,}5$ *ма*, $I_{02}=I_{03}=60$ *ма*. Определить: а) сопротивление R_1, если напряжение смещения должно быть $U_{0c1}=-4$ *в*; б) сопротивление R_4, если напряжение смещения должно быть $U_{0c2}=U_{0c3}=-48$ *в*; в) какую емкость должен иметь конденсатор C_1, если низшая частота входного напряжения равна 30 *гц*? г) падение напряжения на дросселе *Др*, если его омическое сопротивление $R_{др}=300$ *ом*; д) анодное напряжение на обеих оконечных лампах, если напряжение на конденсаторе фильтра C_5 равно 350 *в*, а омическое сопротивление первичной обмотки выходного трансформатора $R_{тр3}=500$ *ом*.

Ответ: а) 1 600 *ом*; б) 400 *ом*; в) $C_1=30$ *мкф*; г) 37 *в*; д) 250 *в*.

4-46. Двухтактный усилитель отдает мощность $P=10$ *вт*. Рассеиваемая на аноде каждой лампы мощность равна 15 *вт*. Определить: а) подводимую к лампам мощность P_0 и к. п. д. в режиме класса А; б) рассеиваемую на анодах мощность при работе усилителя в классе В при той же отдаваемой мощности P, подводимую мощность к лампам и к. п. д. в этом случае.



Фиг. 4-18.

Решение.

а) для усиления в классе А: $P_0=P+2P_a=10+2\cdot 15=40$ *вт*;

$$\text{к. п. д. } \eta=\frac{P}{P_0}=\frac{10}{40}=0{,}25=25\%;$$

б) для усиления в классе В при той же отдаваемой мощности, что и в режиме класса А, рассеиваемую на анодах мощность можно приближенно определить из соотношения: $P_{a\,(B)}=0{,}2\,P_{a\,(A)}$, т. е. на анодах ламп рассеивается только $0{,}2\cdot 30=6$ *вт*.

Подводимая мощность $P_0=10+6=16$ *вт*;

$$\text{к. п. д. } \eta=\frac{10}{16}=0{,}625=62{,}5\%.$$

4-47. В двухтактном усилителе класса В анодное нагрузочное сопротивление для каждой лампы $R_a = 1500$ *ом*, а сопротивление динамика $R_н = 5$ *ом*. Определить: а) коэффициент трансформации выходного трансформатора; б) коэффициент трансформации, если усилитель работает в классе А и нагрузочное сопротивление равно 6 000 *ом* на каждую лампу.

Решение. Так как в классе В лампы работают попеременно, т. е. в работе участвует только половина первичной обмотки трансформатора, то

$$n = w_2 : \frac{w_1}{2} = 2 \cdot \frac{w_2}{w_1} = 2n_B = \sqrt{\frac{R_н}{R_a}} = \sqrt{\frac{5}{1\,500}} = 0{,}058,$$

откуда

$$n_B = \frac{n}{2} = 0{,}029 = 1:34{,}6.$$

В случае усилителя класса А

$$R_A = 2R_a;$$

следовательно,

$$n_A = \sqrt{\frac{R_н}{2R_a}} = \sqrt{\frac{5}{12\,000}} = 0{,}0204 = 1:49.$$

4-48. В двухтактном усилителе класса А имеется выходной трансформатор, создающий нагрузочное сопротивление 10 000 *ом* (между анодами ламп). Активное сопротивление динамика равно 10 *ом*. Определить: а) коэффициент трансформации; б) нагрузочные сопротивления для каждой лампы в отдельности.

Ответ: а) 1:31,6; б) 5 000.

Обратная связь в усилителях низкой частоты. Коэффициент усиления при применении обратной связи определяется по формуле

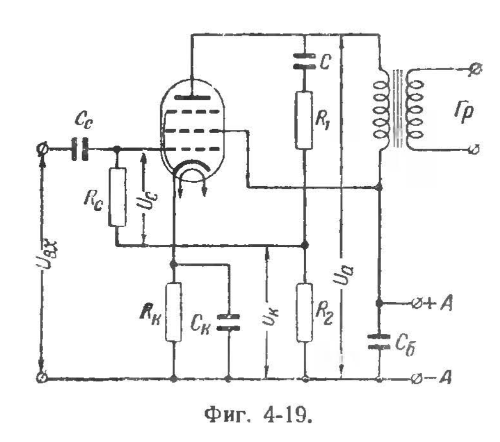
$$K' = \frac{K}{1 - \beta K}, \tag{4-63}$$

где βK — коэффициент обратной связи, а величина β показывает, какая часть выходного напряжения усилителя подается обратно на его вход.

Если напряжение обратной связи совпадает по фазе с напряжением на входе усилителя — связь положительна, β — положительно, и результирующий коэффициент усиления возрастает, как это следует из формулы (4-63).

Если напряжение обратной связи противоположно по фазе с напряжением на входе усилителя — связь отрицательна, β — отрицательно. Тогда результирующий коэффициент уменьшается и равен

$$K' = \frac{K}{1 + \beta K}. \tag{4-64}$$



Фиг. 4-19.

Применение отрицательной обратной связи в усилителях способствует уменьшению искажений и фона, а также улучшает стабильность работы усилителя.

При глубокой отрицательной обратной связи результирующий коэффициент усиления $K' \approx \frac{1}{\beta}$, т. е. коэффициент усиления определяется только элементами, образующими цепь обратной связи.

При применении отрицательной обратной связи по напряжению согласно схеме (фиг. 4-19)

$$\beta = \frac{R_2}{R_1 + R_2}. \tag{4-65}$$

При применении обратной связи по току согласно схеме (фиг. 4-20)

$$\beta = \frac{R_k}{R_a}. \tag{4-66}$$

Если напряжение обратной связи снимается со вторичной обмотки трансформатора, то коэффициент β

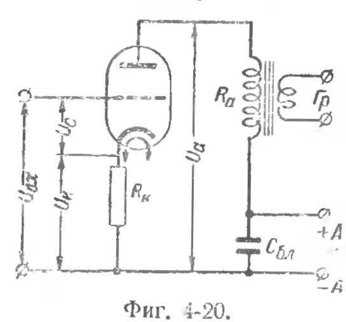
определяется с учетом коэффициента трансформации. Например, для схемы фиг. 4-21 имеем

$$\beta = \frac{R_2 n}{R_1 + R_2}, \qquad (4\text{-}67)$$

где n — коэффициент трансформации выходного трансформатора.

Примеры и задачи.

4-49. Коэффициент искажений оконечного пентода с помощью обратной связи по напряжению (фиг. 4-19) уменьшается в три раза. Без обратной связи коэффициент усиления равен 30, а амплитуда напряжения на сетке равна 12 *в*. Определить: а) коэффициент усиления при наличии обратной связи; б) входное напряжение для получения той же выходной мощности, что и при отсутствии обратной связи; в) сопротивление R_2, если сопротивление $R_1 = 500\,000$ *ом*.



Фиг. 4-20.

Решение:

а) при применении отрицательной обратной связи искажения уменьшаются во столько же раз, во сколько уменьшается усиление. Следовательно, $K' = \frac{30}{3} = 10$.

б) При применении отрицательной обратной связи необходимое входное напряжение увеличивается во столько раз, во сколько уменьшается усиление:

$$U'_c = \frac{K}{K'} U_c = 3 \cdot 12 = 36 \text{ в}.$$

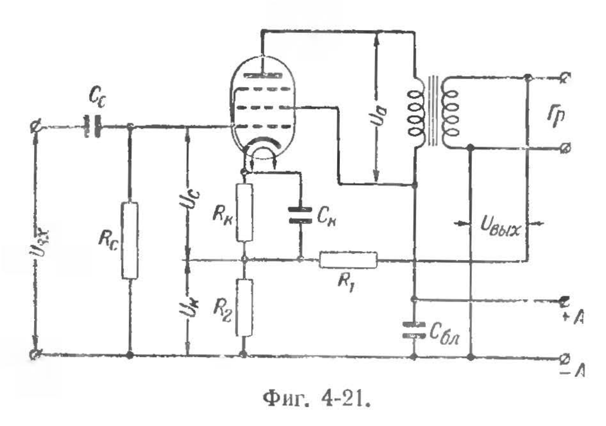
в) Коэффициент усиления при применении отрицательной обратной связи вычисляется по формуле (4-64), откуда

$$\beta = \frac{K - K'}{KK'} = \frac{30 - 10}{30 \cdot 10} = \frac{20}{300} = \frac{1}{15} = 0{,}0667.$$

Тогда согласно формуле (4-65)

$$R_2 = \frac{\beta R_1}{1 - \beta} = \frac{500\,000 \cdot 0{,}0667}{1 - 0{,}0667} = 35\,700 \text{ ом}.$$

4-50. Пентод 6П6Б (6Ф6) работает в схеме, аналогичной схеме фиг. 4-20, при $R_a = 7\,000$ *ом* и $U_c = 16{,}5$ *в*. Сопротивление в цепи катода $R_к = 410$ *ом* используется для получения обратной связи по току. Определить: а) коэффициент усиления каскада с обратной связью, если при отсутствии обратной связи $K = 20$; б) во сколько раз



Фиг. 4-21.

уменьшится коэффициент искажений при применении обратной связи? в) чему должно быть равно входное напряжение, чтобы получить ту же выходную мощность, что и при отсутствии обратной связи?

Ответ: а) $K' = 9{,}2$; б) в 2,17 раза; в) 35,6 *в*.

4-51. В усилителе низкой частоты согласно схеме фиг. 4-21 применена отрицательная обратная связь по напряжению. Коэффициент усиления без обратной связи $K = 700$. Определить: а) коэффициент усиления при наличии обратной связи, если сопротивления R_1 и R_2 соответственно равны 150 и 25 *ом*, а выходной трансформатор имеет коэффициент трансформации $n = 1:20$; б) во сколько раз уменьшаются искажения? в) результирующее напряжение на сетке, если входное напряжение $U_c = 15$ *в*.

Ответ: а) 117; б) в шесть раз; в) 2,5 *в*.

4-52. Коэффициент усиления усилителя $K_1 = 100$ при частоте $f_1 = 400$ *гц* и $K_2 = 10$ при частоте $f_2 = 50$ *гц*. Определить, на сколько дебицел усиление на частоте f_2

меньше усиления на частоте f_1 при отсутствии отрицательной обратной связи и при наличии обратной связи с $\beta=4\%$.

Решение. Усиление или ослабление в децибелах выражается формулой

$$10\lg\frac{P_1}{P_2}=20\lg\frac{U_1}{U_2}=20\lg\frac{K_1}{K_2}, \qquad (4\text{-}68)$$

где P — означает мощность;
U — напряжение.

Таблица усиления или ослабления в децибелах для различных отношений мощностей и напряжений дана в приложении.

Без обратной связи усиление при частоте f_1 больше, чем усиление при частоте f_2 на

$$20\lg\frac{K_1}{K_2}=20\lg\frac{100}{10}=20\ \textit{дб}.$$

При наличии обратной связи коэффициент усиления на частоте f_1 равен

$$K_1'=\frac{K_1}{1+\beta K_1}=\frac{100}{1+0{,}04\cdot 100}=20.$$

Аналогично усиление на частоте f_2 равно

$$K_2'=\frac{10}{1+0{,}04\cdot 10}=7{,}14.$$

С отрицательной обратной связью усиление при частоте f_1 больше, чем усиление при частоте f_2 всего лишь на

$$20\lg\frac{20}{7{,}14}=9\ \textit{дб}.$$

4-53. Общее усиление усилителя $K_1=160$ на частоте $f_1=1\,000$ *гц* и $K_2=20$ на частоте $f_2=30$ *гц*. Чему равна разность усиления в децибелах: а) при отсутствии обратной связи; б) при введении обратной связи с $\beta=10\%$?

Ответ: а) 18 *дб*; б) 3 *дб*.

4. УСИЛИТЕЛИ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

Усилитель на сопротивлениях (фиг. 4-10). В усилителях в. ч. на сопротивлениях для получения равномерного усиления в широкой полосе частот R_a выбирается намного меньше R_i. Поэтому на основании формулы (4-24) усиление на средних частотах

$$K_{ср}\approx SR_a. \qquad (4\text{-}69)$$

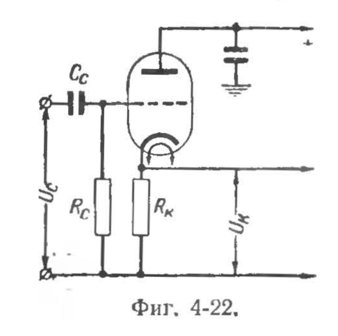
Если усиление на низшей и высшей частотах полосы пропускания не должно отличаться от усиления на средних частотах более чем на 30% (3 *дб*), то низшая частота определяется из формулы (4-27), а высшая частота определяется формулой (4-30), в которой вместо R нужно подставить R_a.

Задача.

4-54. Широкополосный усилитель по схеме фиг. 4-10 на лампе 6Ж14Б (6АС7) имеет следующие данные: $\mu=9\,000$, $R_i=10^6$ *ом*, $R_a=10^4$ *ом*, $R_c=10^6$ *ом*, $C_c=5\,000$ *мкмкф*, $C_ш=10$ *мкмкф*. Определить: а) коэффициент усиления на средних частотах; б) низшую и в) высшую частоты усиливаемого напряжения.

Ответ: а) 90; б) 32 *гц*; в) 1,6 *мггц*.

Усилитель с катодным выходом. Для получения равномерного усиления в широкой полосе частот в усилителях в. ч. на сопротивлениях между отдельными каскадами усиления (обычно на пентодах) включаются каскады с очень малым усилением, большим входным и малым выходным сопротивлениями. Выходное напряжение в этом каскаде снимается с сопротивления в цепи катода. Такой каскад усиления (обычно на триоде) называется усилителем с катодным выходом (фиг. 4-22). Усиление этого каскада определяется формулой



Фиг. 4-22.

$$K=\frac{U_к}{U_c}=\frac{\mu R_к}{R_i+R_к(\mu+1)}. \qquad (4\text{-}70)$$

Для пентодов μ намного больше единицы, поэтому

$$K \approx \frac{R_к}{\frac{1}{S} + R_к}. \quad (4\text{-}71)$$

Из формул 4-70 и 4-71 следует, что усиление каскада с катодным выходом всегда меньше единицы.

Выходное сопротивление каскада с катодным выходом

$$R_{вых} = \frac{R_к R_i}{R_i + R_к(\mu + 1)}. \quad (4\text{-}72)$$

Для каскада на пентоде выходное сопротивление

$$R_{вых} \approx \frac{R_к}{1 + R_к S}. \quad (4\text{-}73)$$

Задачи.

4-55. Усилитель с катодным выходом собран на лампе 6С2 (6Ж5), для которой $\mu = 20$, $R_i = 10\,000$ *ом*, $R_к = 1\,000$ *ом*. Определить K и $R_{вых}$.

Ответ: $K = 0{,}65$; $R_{вых} = 323$ *ом*.

4-56. В усилителе с катодным выходом работает лампа 6П6Б. Определить: а) усиление каскада; б) выходное сопротивление, если $R_к = 5\,000$ *ом*, $R_i = 78\,000$ *ом* и $S = 2{,}5$ *ма/в*.

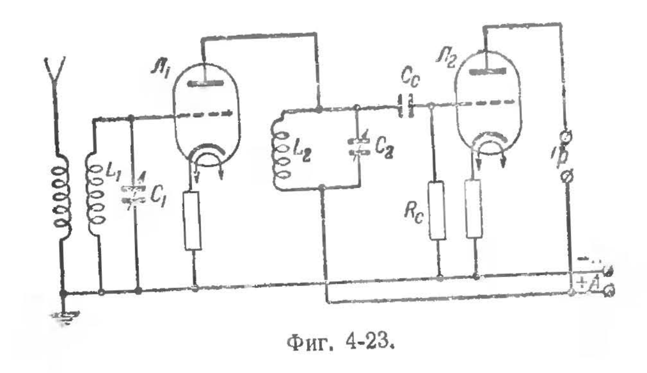
Ответ: а) 0,93; б) 370 *ом*.

Усилитель с настроенным анодным контуром. Коэффициент усиления каскада (фиг. 4-23) приближенно определяется по формуле (4-20а), а более точно—по формуле (4-20), где $R_a = Z_p$.

Согласно формулам (2-63), (2-55) и (2-55а) коэффициент усиления каскада можно подсчитать по одной из следующих формул

$$K = SZ_p = S\frac{L}{CR} = S\frac{1}{2\pi \Delta FC} = \frac{S}{C} \cdot \frac{Q}{2\pi f_p} =$$

$$= SX_C Q = \frac{SX_C}{\delta}. \quad (4\text{-}74)$$



Фиг. 4-23.

Примеры и задачи.

4-57. Каскад усиления высокой частоты на лампе 6Ж11Б с настроенным на частоту 800 *кгц* контуром в цепи анода имеет следующие данные. Общая емкость контура $C = 360$ *мкмкф*, сопротивление потерь контура $R = 10$ *ом*, внутреннее сопротивление лампы $R_i = 900\,000$ *ом*, крутизна $S = 4{,}9$ *ма/в*. Определить: а) резонансное сопротивление контура; б) коэффициент усиления каскада; в) затухание контура; г) добротность контура; д) ширину резонансной кривой.

Решение.

а) Так как при резонансе $\omega^2 LC = 1$, то

$$Z_p = \frac{L}{CR} = \frac{1}{\omega^2 C^2 R} = \frac{1}{(6{,}28 \cdot 8 \cdot 10^5)^2 \cdot (360 \cdot 10^{-12})^2 \cdot 10} =$$

$$= \frac{1}{25{,}6 \cdot 10^{12} \cdot 1296 \cdot 10^{-22} \cdot 10} = \frac{10^{10}}{332\,000} = \frac{10^7}{332} = 30\,700 \text{ ом}.$$

б) $K = SZ_p = 4{,}9 \cdot 10^{-3} \cdot 30\,700 = 150.$

Далее, согласно формуле (4-74)

в) $\delta = \frac{X_C}{Z_p} = \frac{1}{6{,}28 \cdot 8 \cdot 10^5 \cdot 360 \cdot 10^{-12} \cdot 30\,700} = 0{,}018.$

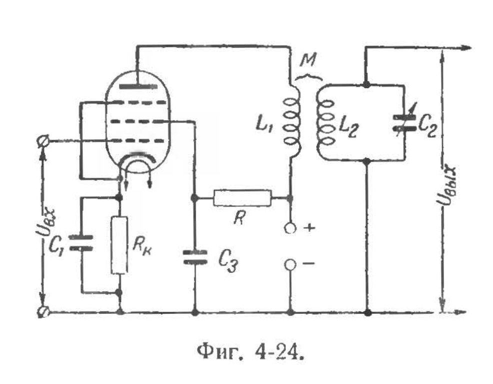
г) $Q = \frac{1}{\delta} = \frac{1}{0{,}018} = 55{,}5.$

д) $\Delta F = \frac{f_p}{Q} = \frac{800}{55{,}5} = 14{,}4$ *кгц*.

4-58. В каскаде на лампе 6К7Б анодный контур с емкостью 300 *мкмкф* и $R = 10$ *ом* настроен на волну 400 *м*. Лампа имеет $R_i = 0{,}83$ *мгом* и $\mu = 1\,200$. Определить: а) резонансное сопротивление контура; б) усиление каскада; в) затухание контура; г) добротность контура.

Ответ: а) 50 000 *ом*; б) 72,5; в) 0,0141; г) 71.

4-59. Лампа 6Ж17Б работает как усилитель класса А. Крутизна характеристики лампы $S = 1{,}575$ *ма/в*, внутреннее сопротивление $R_i = 0{,}7$ *мгом* при $U_{0a} = 100$ *в*, $U_{0э} = 100$ *в*, $U_{0c} = -3$ *в*. Определить: а) Чему должно быть равно резонансное сопротивление контура, включенного в анодную цепь лампы, чтобы коэффициент усиления напряжения равнялся 90? б) Чему будет равен ток I_a, если амплитуда напряжения на сетке $U_c = 20$ *мв*? в) Чему будет равно напряжение на контуре?



Фиг. 4-24.

Ответ: а) 62 000 *ом*; б) 28,9 *мка*; в) 1,8 *в*.

Усилитель на трансформаторах. а) Трансформатор с настроенным вторичным контуром. В случае применения трансформаторной связи с настроенным контуром во вторичной цепи (фиг. 4-24) коэффициент усиления каскада определяется приближено по формуле

$$K \approx SZ_э \qquad (4\text{-}78)$$

где

$$Z_э = \frac{\omega M Q_2}{1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2 R_i}} = \frac{\omega M Q_2}{1 + \frac{R_{вн}}{R_2}} \qquad (4\text{-}79)$$

Здесь $Z_э$ — эквивалентное анодное нагрузочное сопротивление; $Q_2 = \frac{\omega L_2}{R_2}$; $R_{вн} = \frac{\omega^2 M^2}{R_i}$ — сопротивление, вносимое в контур L_2C_2 со стороны первичной цепи.

Если R_i велико (например, при применении пентодов), то

$$Z_э \approx \omega M Q_2 \qquad (4\text{-}80)$$

или на основании формул (1-29), (3-11б) и (2-63)

$$Z_э = \frac{k}{n} Z_p, \qquad (4\text{-}81)$$

где k — коэффициент связи;

n — коэффициент трансформации;

Z_p — резонансное сопротивление контура L_2, C_2.

Примеры и задачи.

4-60. В каскаде усиления в. ч. задачи 4-58 вместо настроенного контура включен трансформатор в. ч., настроенная вторичная цепь которого имеет те же данные, что и контур задачи 4-58. Коэффициент связи $k = 3\%$ и коэффициент трансформации $n = 1$. Определить: а) величину $Z_э$; б) усиление каскада; в) как изменится избирательность каскада.

Решение.

а) $Z_э = 0{,}03 \cdot 50\,000 = 1\,500$ *ом*;

б) $K = \frac{1\,200}{0{,}83 \cdot 10^6}\, 1\,500 = 2{,}17$;

в) избирательность остается приблизительно той же, так как $R_{вн}$ мало. Добротность контура L_2, C_2 также изменится незначительно.

4-61. В усилителе по схеме фиг. 4-24 используется лампа с крутизной характеристики $S = 2$ *ма/в*. Определить коэффициент усиления каскада на волне $\lambda = 300$ *м*, если коэффициент трансформации $n = 1$, коэффициент связи $k = 0{,}05$, $C_2 = 100$ *мкмкф*, сопротивление потерь вторичного контура $R_2 = 10$ *ом*.

Ответ: 21.

4-62. Усилитель с ненастроенной первичной и настроенной вторичной цепями работает на лампе 6К17Б, имеющей $S=2{,}35$ *ма/в* и $R_i=120\,000$ *ом*. Данные схемы: $L_1=200$ *мкгн*, $L_2=340$ *мкгн*, $R_2=14{,}5$ *ом*, $k=0{,}5$. Чему равно усиление каскада при 1 000 *кгц*?

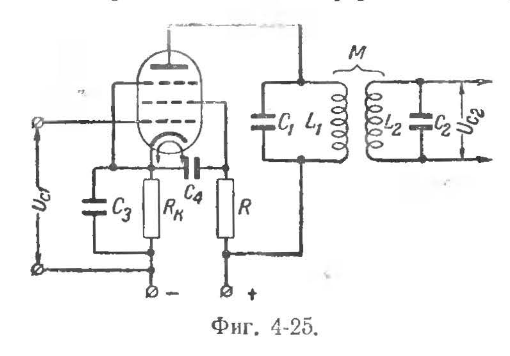
Ответ: 181.

4-63. Чему равно усиление в усилителе предыдущей задачи при

$$k=0{,}7;\quad k=0{,}8;\quad k=0{,}9?$$

Ответ: 226; 228; 226.

б) Трансформатор с настроенными первичным и вторичным контурами. В случае при-



Фиг. 4-25.

менения трансформаторной связи с настроенными первичной и вторичной цепями (фиг. 4-25) усиление каскада определяется формулой (4-78), для которой

$$Z_э=\frac{\omega M}{k^2+\frac{1}{Q_1Q_2}},\tag{4-82}$$

где

$$Q_1=\frac{\omega L_1}{R_1+R_{вн}};\quad Q_2=\frac{\omega L_2}{R_2};\quad k=\frac{M}{\sqrt{L_1L_2}}.$$

Здесь $R_{вн}$ — сопротивление, вносимое в контур L_1C_1 шунтирующим действием лампы и равное $R_{вн}=\frac{(\omega L_1)^2}{R_i}$. При большом R_i величиной $R_{вн}$ можно пренебречь.

Для получения максимального усиления необходимо, чтобы

$$k=k_{кр}=\frac{1}{\sqrt{Q_1Q_2}}\ \text{[см. формулу (3-12)]}.$$

Тогда

$$Z_э=\frac{\omega\sqrt{L_1L_2Q_1Q_2}}{2}.\tag{4-83}$$

Практически обычно $Q_1=Q_2=Q$, т. е. контуры одинаковы; тогда

$$Z_э=\frac{\omega M}{k^2+\frac{1}{Q^2}},\tag{4-84}$$

и максимальное усиление получается при $k=k_{кр}=\frac{1}{Q}$. В этом случае

$$Z_э=0{,}5\omega MQ^2=0{,}5\omega LQ\tag{4-85}$$

или

$$Z_э=0{,}5Z_p.\tag{4-86}$$

Для получения равномерной полосы пропускания согласно формуле (3-14) необходимо, чтобы

$$Z_э\approx 0{,}25\omega MQ^2\tag{4-87}$$

или

$$Z_э\approx 0{,}25Z_p.\tag{4-88}$$

Примеры и задачи.

4-64. Усилитель промежуточной частоты 460 *кгц* работает на лампе 6К7Б, имеющей $S=1{,}45$ *ма/в*. Данные схемы: $L_1=L_2=800$ *мкгн*, $Q_1=100$, $Q_2=120$ и $k=0{,}016$. а) Чему равно усиление каскада? б) Чему равна ширина пропускаемой усилителем полосы частот?

Решение

а) $K=Sk\dfrac{2\pi f_p\sqrt{L_1L_2}}{k^2+\frac{1}{Q_1Q_2}}=$

$$=\frac{1{,}45\cdot10^{-3}\cdot0{,}016\cdot6{,}28\cdot460\cdot10^3\cdot800\cdot10^{-6}}{0{,}016^2+\frac{1}{100\cdot200}}=158;$$

б) согласно формуле (3-13) $\Delta F_{св}=1{,}2kf_p=1{,}2\cdot0{,}016\cdot460\approx\approx 8{,}8$ *кгц*.

4-65. Усилитель промежуточной частоты 460 *кгц* работает на лампе 6К17Б, имеющей $S=2{,}35$ *ма/в*. Данные схемы: $L_1=700$ *мкгн*, $L_2=600$ *мкгн*, $Q_1=70$, $Q_2=100$, $k=0{,}02$. Чему равно усиление?

Ответ: 162.

4-66. а) Чему должно быть равно k в усилителе предыдущей задачи, чтобы получить максимальное усиление K? б) Чему равно K максимальное?

Ответ: а) 0,012; б) 185.

4-67. Намечено использовать в каскаде усиления промежуточной частоты лампу 6К7Б при $U_{0a}=250$ *в*, $U_{0э}=125$ *в* и $U_{0c}=-3$ *в*. Частота $f=460$ *кгц*, $C_1=C_2=119$ *мкмкф*, $k=0{,}02$, $L_1=L_2=1$ *мгн*. Активное сопротивление катушек $R_1=R_2=24$ *ом*. Определить коэффициент усиления каскада.

Решение. Из характеристики лампы находим, что при заданном режиме $S=1{,}65$ *ма/в*, $R_i=600\,000$ *ом*,

$$Q_2=\frac{2\pi fL_2}{R_2}=\frac{6{,}28\cdot460\cdot10^3\cdot1\cdot10^{-3}}{24}=\frac{2\,890}{24}=120{,}4.$$

Для определения Q_1 предварительно нужно определить сопротивление потерь $R_{вн}$, вносимое лампой в первичный контур. Согласно задаче (2-75)

$$R_{вн}=\frac{X_L^2}{R_i}=\frac{2\,890^2}{6\cdot10^5}=14\ ом.$$

Следовательно,

$$Q_1=\frac{2\pi fL_1}{R_1+R_{вн}}=\frac{2\,890}{24+14}=76;$$

$$K=\frac{1{,}65\cdot10^{-3}\cdot0{,}02\cdot6{,}28\cdot460\cdot10^3\cdot10^{-3}}{0{,}02^2+\frac{1}{76\cdot120{,}4}}=187.$$

4-68. Чему будет равно максимальное возможное усиление в предыдущей задаче?

Ответ: 227.

4-69. Определить максимальное усиление каскада промежуточной частоты задачи 4-66, если $L_1=L_2=650$ *мкгн*, а $Q_1=Q_2=87{,}5$.

Ответ: 194.

4-70. Определить, какую полосу частот пропускает каскад предыдущей задачи.

Ответ: 11 *кгц*.

4-71. Какую полосу частот будет пропускать усилитель задачи 4-70, если $k=1{,}75k_{кр}$?

Ответ: 7,4 *кгц*.

4-72. Каким сопротивлением нужно зашунтировать оба контура задачи 4-72, чтобы получить полосу пропускания задачи 4-71? Какое при этом получится усиление?

Решение. Необходимое

$$Q_э=\frac{1{,}41f_p}{\Delta F_{св}}=\frac{1{,}41\cdot460}{11}=59,$$

откуда

$$R_э=\frac{\omega L}{Q_э}=\frac{6{,}28\cdot460\cdot10^3\cdot650\cdot10^{-6}}{59}=\frac{1\,880}{59}=31{,}8\ ом.$$

Для незашунтированного контура

$$R=\frac{1\,880}{87{,}5}=21{,}4\ ом.$$

Таким образом, вносимое сопротивление $R_{вн}=31{,}8-21{,}4=10{,}4$ *ом*.

Шунтирующее сопротивление

$$R_ш=\frac{X_L^2}{R_{вн}}=\frac{1\,880^2}{10{,}4}=340\,000\ ом.$$

Усиление каскада уменьшится и будет равно

$$K=S\frac{k\omega\sqrt{L_1L_2}}{k^2+\frac{1}{Q_1Q_2}}=2{,}35\cdot10^{-3}\cdot\frac{0{,}0114\cdot6{,}28\cdot460\cdot10^3\cdot650\cdot10^{-6}}{0{,}0114^2+\frac{1}{59^2}}=120.$$

4-73. а) Чему должен быть равен коэффициент связи k в усилителе предыдущей задачи, чтобы получить ма-

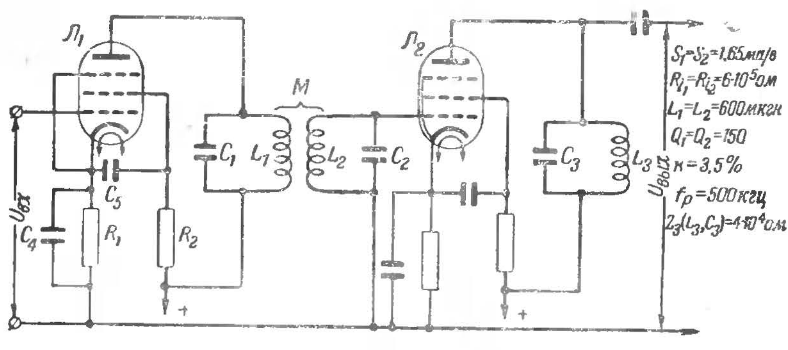
ксимальное усиление? б) Чему будет равно максимальное усиление K?

Ответ: а) 0,017; б) 130.

4-74. а) Чему равна пропускаемая полоса частот в усилителе задачи 4-73, если $k = 1,75k_{кр}$? б) Чему должно быть равно в этом случае $Z_э$? в) Какое усиление получается в этом случае?

Ответ: а) 16,5 *кгц*; б) 27 800 *ом*; в) 65.

4-75. Для получения более равномерного усиления в заданной полосе частот применен двухкаскадный



Фиг. 4-26.

усилитель по схеме фиг. 4-26. Данные схемы указаны на чертеже. Определить коэффициенты усиления: а) первого каскада; б) второго каскада; в) всего усилителя.

Ответ: а) 85,7; б) 61,8; в) 5 300.

Усиление в преобразовательном каскаде. Коэффициент усиления преобразовательного каскада приближенно определяется формулой

$$K \approx S_{пр} Z_э, \qquad (4\text{-}89)$$

где $S_{пр}$ — **крутизна преобразования**, которая в обычных условиях работы преобразователя равна

$$S_{пр} \approx (0,25 - 0,3)\,S. \qquad (4\text{-}90)$$

Задачи.

4-76. Лампа 6А5Б (6Л7) при работе в качестве усилителя высокой частоты имеет статическую крутизну характеристики $S = 1,2$ *ма/в*. Определить: а) крутизну преобразования, если лампу использовать как преобразователь; б) амплитуду тока промежуточной частоты в цепи анода, если амплитуда напряжения на сигнальной сетке равна 200 *мв*.

Ответ: а) 0,35 *ма/в*; б) 0,07 *ма*.

4-77. Напряжение высокой частоты на сигнальной сетке лампы 6А8Б равно 150 *мкв*. Эквивалентное сопротивление контура промежуточной частоты в анодной цепи лампы равно 150 000 *ом*. Крутизна преобразования равна 0,51 *ма/в*. Определить: а) усиление каскада; б) напряжение на контуре.

Ответ: а) 76,5; б) 11,5 *мв*.

4-78. Пентагрид 6А10 (6SA7) при нулевом смещении на сигнальной сетке имеет крутизну преобразования 0,45 *ма/в*, а при смещении (—35) *в* крутизна преобразования равна 0,002 *ма/в*. Эквивалентное сопротивление контура промежуточной частоты равно 300 000 *ом*. Определить коэффициент усиления в обоих случаях.

Ответ: 135 и 0,6.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ

1. ДИОДНОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ

Напряжение низкой частоты, получаемое на нагрузочном сопротивлении диода при детектировании высокочастотного модулированного напряжения по схемам (фиг. 5-1), определяется по формуле

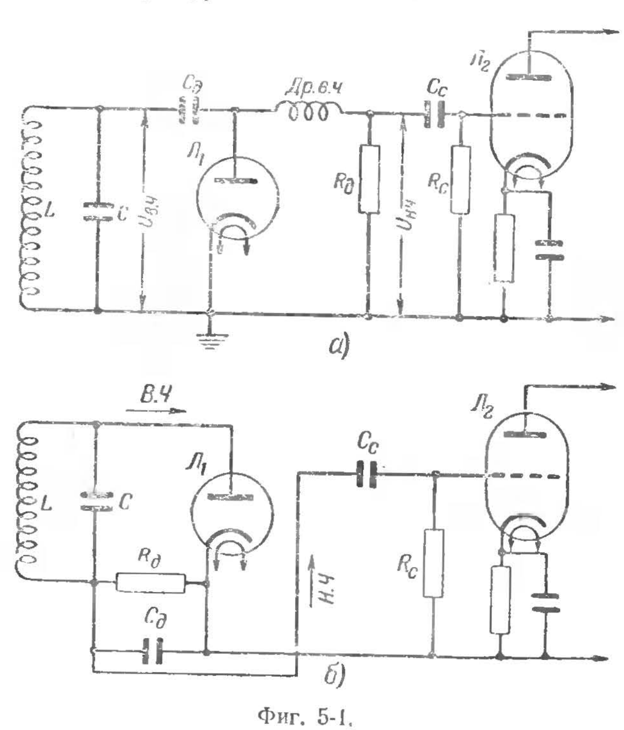
$$U_{нч} = amU_{вч}, \qquad (5\text{-}1)$$

где m — коэффициент модуляции;

$a \approx 1$, если нагрузочное сопротивление диода $R_д$ больше, чем внутреннее сопротивление лампы R_i и если произведение

$$R_д C_д \leqslant \frac{1}{\omega_{нч\ макс}}. \qquad (5\text{-}2)$$

Условие (5-2) показывает, что постоянная времени $R_д C_д$ должна быть значительно меньше периода максимальной модулирующей частоты.



Фиг. 5-1.

Если $U_{вч} > 0{,}3$ *в*, а сопротивление утечки следующей лампы R_c значительно больше, чем нагрузочное сопротивление $R_д$, то для случая п а р а л л е л ь н о й схемы диодного детектора (фиг. 5-1, *а*), его входное сопротивление, шунтирующее контур, равно

$$R_{вх} = \frac{R_д}{3}. \qquad (5\text{-}3)$$

Для случая п о с л е д о в а т е л ь н о й схемы диодного детектора (фиг. 5-1,*б*)

$$R_{вх} = \frac{R_д}{2}. \qquad (5\text{-}4)$$

Чтобы детектирование происходило без значительных нелинейных искажений, необходимо выполнение условия

$$m \leq \frac{R_э}{R_д}, \qquad (5\text{-}5)$$

где

$$R_э = \frac{R_д R_c}{R_д + R_c}.$$

Примеры и задачи.

5-1. Диодный детектор работает на триодный усилитель низкой частоты с коэффициентом усиления $K = 25$. К диоду подведено высокочастотное модулированное низкой частотой напряжение $U_{вч} = 10$ *в*. Коэффициент модуляции $m = 40\%$. Определить: а) амплитуду переменного напряжения низкой частоты на сетке триода; б) амплитуду переменного напряжения на выходе усилителя низкой частоты.

Р е ш е н и е.

а) $U_{нч} = 0{,}4 \cdot 10 \cdot 1{,}41 = 5{,}65$ *в*;

б) $U_a = U_{нч} \cdot K = 5{,}65 \cdot 25 = 141$ *в*.

5-2. После диодного детектора в приемнике имеется оконечный каскад на пентоде, который отдает полную мощность, если действующее значение переменного напряжения на сетке равно 5 *в*. Определить: а) величину напряжения высокой частоты, которое нужно подать на детектор, если коэффициент модуляции $m = 30\%$; б) какое напряжение высокой частоты необходимо подать на детектор в случае, если оконечный каскад должен отдать лишь половину мощности.

Ответ: а) 16,7 *в*; б) 11,8 *в*.

5-3. К диодному детектору подключен усилитель низкой частоты, имеющий сопротивление утечки 1 *мгом*. Определить: а) максимальную величину сопротивления нагрузки диода постоянному току, если детектирование без искажений должно иметь место для коэффициента

модуляции до 70%; б) величину сопротивления, шунтирующего колебательный контур при параллельной и последовательной схемах диодного детектора.

Решение.

а) $m \leqslant \frac{R_э}{R_д} = \frac{R_д R_c}{(R_д + R_c) R_д}$

или

$$(R_д + R_c)\, m = R_c\,,$$

откуда

$$R_д = \frac{R_c}{m} - R_c = \frac{1}{0,7} - 1 = 0,43 \text{ мгом} = 430\,000 \text{ ом};$$

б) $R_ш = R_{вх} = \frac{R_д}{3} = \frac{430\,000}{3} = 143\,000$ *ом*

при параллельной схеме и

$$R_ш = R_{вх} = \frac{R_д}{2} = \frac{430\,000}{2} = 215\,000 \text{ ом}$$

при последовательной схеме.

5-4. К однополупериодному диодному детектору подведено высокочастотное модулированное напряжение 10 *в*. Глубина модуляции $m = 50\%$. Определить амплитуду напряжения низкой частоты после детектора.

Ответ: 7 *в*.

5-5. Сопротивление нагрузки диода равно 300 000 *ом*. Коэффициент модуляции $m = 70\%$. Определить: а) наименьшее сопротивление утечки последующего каскада усиления, необходимое для получения малых нелинейных искажений; б) каким сопротивлением шунтируется колебательный контур, если схема детектора — параллельная?

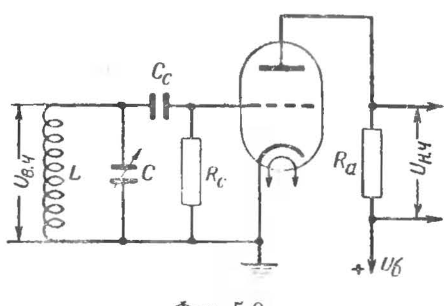
Ответ: а) 700 000 *ом*; б) 100 000 *ом*.

5-6. Определить емкость конденсатора $C_д$ в схеме фиг. 5-1,*б*, если $R_д = 130\,000$ *ом*, $f_{нч\,макс} = 10$ *кгц*.

Ответ: ≈ 100 *мкмкф*.

2. СЕТОЧНОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ

Для сеточного детектирования по схеме (фиг. 5-2) в случае, когда анодное нагрузочное сопротивление



Фиг. 5-2.

для низкой частоты R_a намного больше внутреннего сопротивления лампы R_i, выходное напряжение н. ч.

$$U_{нч} \approx 0,8\, m \mu U_{вч}, \qquad (5\text{-}6)$$

где $U_{нч}$ — выходное низкочастотное напряжение;
m — коэффициент модуляции;
μ — коэффициент усиления лампы;
$U_{вч}$ — входное высокочастотное напряжение.

Емкость C_c и сопротивление утечки R_c входной цепи сеточного детектора должны быть выбраны так, чтобы произведение

$$R_c C_c \approx \frac{0,5}{f_{нч\,макс}}, \qquad (5\text{-}7)$$

причем R_c должно быть порядка 0,3—2 *мгом*, а $C_c = (5-10)\, C_{ск}$, где $C_{ск}$ — емкость сетка-катод лампы. При больших коэффициентах модуляции R_c должно быть меньшим, и наоборот.

Задачи.

5-7. В сеточном детекторе применен пентод, имеющий $S = 2$ *ма/в*, $R_i = 200\,000$ *ом*, $\mu = 400$ и нагруженный на сопротивление $R_a = 2$ *мгом*. Какое высокочастотное

напряжение необходимо подвести к сетке лампы, чтобы выходное низкочастотное напряжение равнялось 12,4 *в*, если коэффициент модуляции равен 0,6?

Ответ: 0,065 *в*.

5-8. Определить постоянную времени R_cC_c для случая задачи 5-7, если $f_{нч\,макс} = 6\,000$ *гц*.

Ответ: $8{,}3 \cdot 10^{-5}$ сек.

3. ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ В СЕТОЧНОМ ДЕТЕКТОРЕ

Если в формуле (4-63) коэффициент обратной связи βK положителен, т. е. напряжение обратной связи $U_{обр}$ совпадает по фазе с напряжением $U_{сигн}$ на входе каскада (положительная обратная связь), то результирующее напряжение на входе каскада возрастает и равно

$$U_c = U_{сигн} + U_{обр} = \frac{U_{сигн}}{1 - \beta K}. \quad (5\text{-}8)$$

Это равносильно увеличению коэффициента усиления каскада (по высокой частоте) до значения

$$K' = \frac{K}{1 - \beta K}. \quad (5\text{-}9)$$

При увеличении β коэффициент обратной связи βK возрастает и по мере приближения βK к единице K' неограниченно растет, и в момент, когда $\beta K = 1$, каскад из состояния усиления колебаний переходит к генерации колебаний, т. е. колебания в каскаде будут существовать и при отсутствии сигнала за счет подаваемого обратной связью на вход каскада части выходного напряжения. Это явление носит название самовозбуждения каскада.

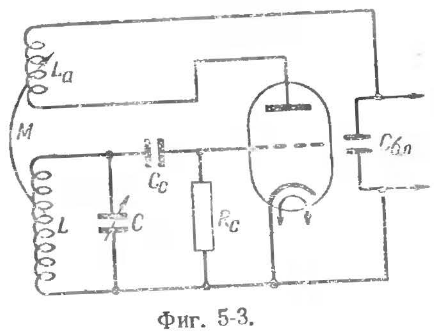
Условие самовозбуждения можно написать в виде

$$\beta = \frac{1}{K}, \quad (5\text{-}10)$$

где K определяется формулой (4-20).

Задачи и примеры.

5-9. Каскад с обратной связью имеет следующие данные. Крутизна характеристики лампы $S = 2$ *ма/в*, внутреннее сопротивление ее $R_i = 12 \cdot 10^3$ *ом*. В цепь сетки включен колебательный контур с индуктивностью $L = 0{,}1$ *мгн*, емкостью $C = 200$ *мкмкф* и активным сопротивлением $R = 10$ *ом*. Индуктивность включенной в анодную цепь катушки обратной связи $L_a = 0{,}1$ *мгн*. Определить: а) при каком значении β каскад самовозбуждится; б) чему при этом должно быть равно напряжение обратной связи, если амплитуда напряжения высокой частоты в анодной цепи равна 25 *в*; в) чему будет равняться коэффициент усиления каскада K' при: 1) $\beta = 0{,}9\frac{1}{K}$; 2) $\beta = 0{,}95\frac{1}{K}$; 3) $\beta = 0{,}98 \cdot \frac{1}{K}$; 4) $\beta = \frac{1}{K}$.



Фиг. 5-3.

Решение. а) В данном случае R_a является индуктивной нагрузкой: $X_a = \omega L_a$.

Находим

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{0{,}1 \cdot 10^{-3} \cdot 200 \cdot 10^{-12}}} = \frac{10^7}{1{,}41} = 7{,}1 \cdot 10^6;$$

$$X_a = 7{,}1 \cdot 10^6 \cdot 0{,}1 \cdot 10^{-3} = 710 \text{ ом}; \quad \mu = SR_i = 2 \cdot 10 \cdot 12 \cdot 10^3 = 24.$$

Следовательно,

$$K = \frac{\mu X_a}{\sqrt{R_i^2 + X^2}} = \frac{24 \cdot 710}{\sqrt{12\,000^2 + 710^2}} = 1{,}42$$

или

$$\beta = \frac{1}{K} = 0{,}706.$$

б) Напряжение обратной связи, которое должно быть подано на сетку лампы, равно

$$U_{обр} = U_a \beta = 25 \cdot 0{,}706 = 17{,}7 \text{ в}.$$

Так как напряжение 17,7 *в* получается в результате усиления в контуре э. д. с. $e_{обр}$, наводимый обратной связью, то $e_{обр} = \frac{U_{обр}}{Q}$, где Q — добротность контура. Величина $e_{обр}$ при данных контуре и катушке обратной связи подбирается изменением связи между ними.

в) $K' = \frac{K}{1-\beta K}$;

1) $K' = \frac{K}{1-\frac{0,9}{K}\cdot K} = \frac{1,42}{0,1} = 14,2$;

2) $K' = \frac{K}{1-\frac{0,95}{K}\cdot K} = \frac{1,42}{0,05} = 28,4$;

3) $K' = \frac{K}{1-\frac{1,98\cdot K}{K}} = \frac{1,42}{0,02} = 71$;

4) $K' = \frac{K}{1-\frac{1}{K}\cdot K} = \frac{1,42}{0} = \infty$ (самовозбуждение).

5-10. Коэффициент усиления по высокой частоте сеточного детектора с обратной связью в восемь раз больше, чем коэффициент усиления при отсутствии обратной связи. а) Чему должна быть равна наводимая в сеточном контуре э. д. с., если его $Q = 100$ и напряжение на сетке при наличии обратной связи равно 0,16 *в*? б) Чему равно β, если коэффициент усиления без обратной связи $K = 21$?

Ответ: а) 0,2 *мв*; б) $\sim$0,042.

5-11. Чувствительность сеточного детектора должна быть повышена с помощью обратной связи в 20 раз; коэффициент усиления без обратной связи равен 30. Определить: а) напряжение на сетке, если напряжение сигнала равно 10 *мв*; б) какое значение должно иметь β?

Ответ: а) 200 *мв* = 0,2 *в*; б) 0,0317 = 3,17%.

5-12. Для каскада задачи 5-11 определить выходное низкочастотное напряжение, если напряжение сигнала на сетке лампы равно 10 *мв*, коэффициент модуляции $m = 0,9$, $\mu = 70$.

Решение.

$$U_c = \frac{U_{сигн}}{1-\beta K} = \frac{10\cdot 10^{-3}}{1-0,0317\cdot 30} = 0,2 \text{ в}.$$

Тогда $U_{нч} = 0,8\cdot m\mu U_c = 0,8\cdot 0,9\cdot 70\cdot 0,2 = 10$ *в*.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

НАСТРАИВАЮЩИЕСЯ ЦЕПИ

Примеры и задачи.

6-1. а) Определить необходимую индуктивность вторичной обмотки трансформатора высокой частоты (предполагая, что распределенная емкость этой обмотки и емкость монтажа равны в сумме 23 *мкмкф*) для получения резонанса на частоте в 1 600 *кгц* при минимальной емкости конденсатора настройки в 17 *мкмкф*; б) какова должна быть максимальная емкость конденсатора настройки для получения резонанса на частоте 550 *кгц*?

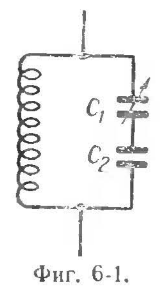
Ответ: а) 246 *мкгн*; б) 317 *мкмкф*.

6-2. Конденсатор переменной емкости с начальной емкостью 13,5 *мкмкф* и максимальной емкостью 320 *мкмкф* используется для настройки всеволнового приемника с диапазонами: 530—1 550 *кгц*; 1,5—4,2 *мггц*, 4—11,5 *мггц* и 11—23 *мггц*. Если пренебречь собственной емкостью катушек и емкостью монтажа, то: а) чему должна быть равна индуктивность катушек на каждом диапазоне? б) чему при этих условиях равна наибольшая резонансная частота в каждом диапазоне?

Ответ: а) 281; 35,1; 4,93 и 0,653 *мкгн*. б) 2 580 *кгц*; 7,3; 19,5 и 53,6 *мггц*.

6-3. Контур с максимальной емкостью конденсатора настройки $C_1 = 200$ *мкмкф* предназначается для настройки в диапазоне от 500 от 1 500 *кгц*. Какой необхо-

димо включить конденсатор C_2 последовательно с C_1 (фиг. 6-1), чтобы можно было при той же индуктивности получить второй диапазон настройки с минимальной частотой 1 500 *кгц*?



Фиг. 6-1.

Решение. При постоянной индуктивности емкость контура обратно пропорциональна квадрату частоты. Поэтому, если обозначить результирующую емкость через C, то можно написать

$$C=\frac{f^2_{1\,мин}}{f^2_{2\,макс}}C_1=\frac{500^2}{1\,500^2}\cdot 200=22{,}2\ мкмкф.$$

Так как

$$C=\frac{C_1C_2}{C_1+C_2},$$

то

$$C_2=\frac{C_1C}{C_1-C}=\frac{22{,}2\cdot 200}{200-22{,}2}\approx 25\ мкмкф.$$

6-4. Минимальная емкость конденсатора настройки контура задачи 6-3 $C_{1\,мин}=22$ *мкмкф*. Определить: а) чему должна быть равна индуктивность контура? б) чему равна максимальная резонансная частота после включения C_2? в) какой общий диапазон частот перекроет такой контур?

Решение.

$$а)\ L_{мгн}=\frac{25{,}3\cdot 10^6}{f^2_{мин}C_{1\,мкмкф}}=\frac{25{,}3\cdot 10^6}{500^2\cdot 200}=0{,}506\ мгн=506\ мкгн.$$

б) Из задачи 6-3 известно, что после включения C_2 емкость $C_{макс}=C=22{,}2$ *мкмкф* и $f_{мин}=1\,500$ *кгц*;

$$C_{мин}=\frac{C_{1\,мин}C_2}{C_{1\,мин}+C_2}=\frac{22\cdot 25}{22+25}=11{,}7\ мкмкф.$$

Следовательно,

$$f_{макс}=\frac{159\cdot 10^3}{\sqrt{LC_{мин}}}=\frac{159\cdot 10^3}{\sqrt{506\cdot 11{,}7}}=2\,060\ кгц.$$

в) Общий перекрываемый контуром диапазон частот равен 500 — 2 061 *кгц*.

6-5. Конденсатор настройки входного контура преобразовательного каскада имеет минимальную емкость 25 *мкмкф* и максимальную емкость 550 *мкмкф*. Емкость монтажа равна 21 *мкмкф*. а) Какую емкость должен иметь включенный параллельно подстроечный конденсатор, если контур должен обеспечить настройку в диапазоне 500 — 1 500 *кгц*? б) Какую индуктивность должна иметь контурная катушка?

Решение

$$а)\ \frac{f_{макс}}{f_{мин}}=\sqrt{\frac{C_{макс}+C_0}{C_{мин}+C_0}},$$

где C_0 представляет сумму емкостей подстроечного конденсатора и емкости монтажа (включая распределенную емкость катушки).

Подставляя числовые значения, получаем

$$\frac{1\,500}{500}=\sqrt{\frac{550+C_0}{25+C_0}}$$

или

$$9=\frac{550+C_0}{25+C_0},$$

откуда $C_0\approx 41$ *мкмкф*. Следовательно,

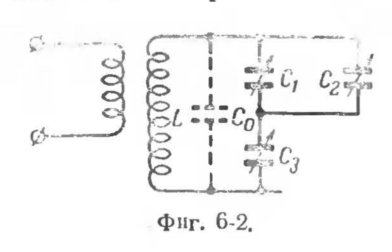
$$C_{подстр}=C_0-C_{монт}=20\ мкмкф.$$

$$б)\ L_{мгн}=\frac{25{,}3\cdot 10^6}{f^2_{мин}(C_{макс}+C_0)}=\frac{25{,}3\cdot 10^6}{500^2(550+41)}=0{,}171\ мгн.$$

6-6. Конденсатор настройки имеет $C_{мин}=10$ *мкмкф* и $C_{макс}=100$ *мкмкф*. В каких пределах будет изменяться результирующая емкость контура, если подстроечную емкость $C_1=20$ *мкмкф* включить: а) параллельно или б) последовательно с конденсатором настройки? в) В каких пределах будет изменяться частота при индуктивности 506 *мкгн*?

Ответ: а) от 30 до 120 *мкмкф*;
б) от 6,67 до 16,67 *мкмкф*;
в) 645 — 1 290 *кгц* и 1 720 — 2 740 *кгц*.

6-7. Гетеродин супергетеродинного приемника настраивается так, что его частота всегда на 465 *кгц* выше, чем частота принимаемого сигнала в диапазоне 530—1 550 *кгц*. Схема контура гетеродина представлена на фиг. 6-2. $L = 200$ *мкгн*, $C_{1\,мин} = 12{,}5$ *мкмкф*, $C_{1\,макс} = 250$ *мкмкф* и $C_2 = 6{,}5$ *мкмкф*. Распределенная емкость контура $C_0 = 15$ *мкмкф*. а) Чему должна быть равна емкость C_3 при настройке приемника на 530 *кгц*? б) При найденном значении C_3 чему будет равна частота гетеродина при настройке приемника на 1 550 *кгц*?



Фиг. 6-2.

Решение.

а) $f_{гет.\,мин} = f_{мин} + 465 = 530 + 465 = 995$ *кгц*;

$$C_{макс} = \frac{25{,}3\cdot 10^9}{f^2_{гет.\,мин}L} = \frac{25{,}3\cdot 10^9}{995^2\cdot 200} = 127{,}7 \text{ мкмкф};$$

$$C_3 = \frac{(C_{1\,макс} + C_2)(C_{макс} - C_0)}{(C_{1\,макс} + C_2)(C_{макс} - C_0)} \frac{(250 + 6{,}5)(127{,}7 - 15)}{256{,}5 - 112{,}7} =$$

$$= 201 \text{ мкмкф};$$

б) $$C_{мин} = \frac{(C_{1\,мин} + C_2)C_3}{(C_{1\,мин} + C_2) + C_3} + C_0 = \frac{19\cdot 201}{19 + 201} + 15 =$$

$$= 32{,}35 \text{ мкмкф};$$

в) $$f_{гет.\,макс} = \frac{159\cdot 10^3}{\sqrt{LC_{мин}}} = \frac{159\cdot 10^3}{\sqrt{200\cdot 32{,}35}} = 1\,980 \text{ кгц},$$

т. е. вместо $1\,550 + 465 = 2\,015$ получилось 1 980.

6-8. Решить предыдущую задачу для следующих условий. Частота колебаний гетеродина всегда должна быть больше принимаемой на 175 *кгц*. $L = 150$ *мкгн*, $C_{1\,макс} = 320$ *мкмкф*, $C_{1\,мин} = 13{,}5$ *мкмкф* и $C_2 = 20$ *мкмкф*. Распределенная емкость $C_0 = 20$ *мкмкф*.

Ответ: а) 5 440 *мкмкф*; б) 1785 *кгц*.

6-9. Супергетеродинный приемник настроен на радиостанцию с несущей частотой 740 *кгц*. Частота гетеродина равна 1 208 *кгц*. Определить: а) промежуточную частоту; в) частоту зеркальной помехи.

Решение.

а) $f_{пром} = f_{гет} - f_{сигн} = 468$ *кгц*;

б) $f_{зерк} = f_{сигн} + 2f_{пром} = 1\,676$ *кгц*.

6-10. При одной и той же частоте гетеродина супергетеродинный приемник принимает сигналы с частотами $f'_{сигн} = 658$ *кгц* и $f''_{сигн} = 904$ *кгц*. Определить промежуточную частоту.

Ответ: 123 *кгц*.

6-11. Промежуточная частота супергетеродинного приемника равна 468 *кгц*. Приемник настроен на станцию с частотой 1 *мггц*. Определить: а) возможные частоты гетеродина; б) соответствующие зеркальные частоты.

Ответ: а) 1 468 и 532 *кгц*; б) 1 936 и 64 *кгц*.

6-12. Супергетеродинный приемник имеет средневолновый диапазон 1 500—500 *кгц* (200—600 *м*), длинноволновый диапазон 300—150 *кгц* (1 000—2 000 *м*) и $f_{пром} = 468$ *кгц*. Определить диапазоны: а) изменения частоты гетеродина и б) зеркальных частот.

Ответ: Для средних волн:

а) 1 968—968 *кгц*,

б) 2 436—1 436 *кгц*;

для длинных волн:

а) 768—618 *кгц*,

б) 1 236—1 086 *кгц*.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

ПИТАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

1. СИЛОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ И АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ

Трансформатор. При упрощенном расчете трансформатора для выпрямителя площадь поперечного сечения сердечника (в $см^2$) вычисляется по формуле

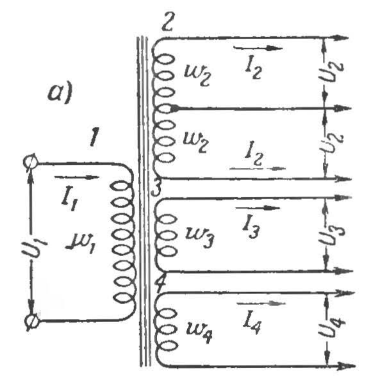
$$S \approx 1{,}2\sqrt{P}, \qquad (7\text{-}1)$$

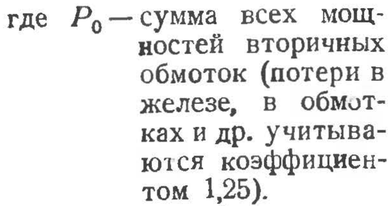
где P — мощность, потребляемая от сети, *вт*.

Для обычных трансформаторов до 100 *вт* потребляемая мощность вычисляется по формуле

$$P = 1{,}25\,P_0, \qquad (7\text{-}2)$$

где P_0 — сумма всех мощностей вторичных обмоток (потери в железе, в обмотках и др. учитываются коэффициентом 1,25).





Фиг. 7-1.

Для обычной схемы силового трансформатора (фиг. 7-1,*а*), работающего на двухполупериодный выпрямитель с фильтром,

$$P_0 = I_0U_0 + I_0^2(R_{др} + R_{i\,пост}) + I_3U_3 + I_4U_4, \qquad (7\text{-}3)$$

I_0 и U_0 — постоянные ток и напряжение, получаемые от выпрямителя;

$R_{др}$ — сопротивление дросселя фильтра постоянному току;

$R_{i\,пост}$ — внутреннее сопротивление кенотрона постоянному току.

Число витков на вольт вычисляется по формуле

$$w_0 = \frac{450\,000}{B \cdot S}, \qquad (7\text{-}4)$$

где S — площадь поперечного сечения сердечника, $см^2$;

B — магнитная индукция в сердечнике трансформатора, *гс*.

Число витков любой обмотки вычисляется по формуле

$$w = w_0U, \qquad (7\text{-}5)$$

где U — напряжение обмотки, *в*.

Напряжение повышающей обмотки U_2 можно приближенно считать равным U_0.

Диаметр провода обмотки в миллиметрах вычисляется по формуле

$$d = 0{,}8\sqrt{I}, \qquad (7\text{-}6)$$

где I — ток в обмотке, *а*.

При этом ток I_2 в повышающей обмотке равен приблизительно I_0 для двухполупериодной схемы выпрямителя и $2I_0$ для однополупериодной схемы.

Примеры и задачи.

7-1. Напряжение первичной обмотки силового трансформатора, работающего на двухполупериодный выпрямитель, $U_1 = 220$ *в*, частота тока сети $f = 50$ *гц*. Напряжения вторичных обмоток: $U_0 = 300$ *в*, $U_3 = 5$ *в*, $U_4 = 6{,}3$ *в*; токи вторичных обмоток: $I_0 = 0{,}1$ *а*, $I_3 = 2$ *а*, $I_4 = 2$ *а*; сопротивление дросселя фильтра $R_{др} = 200$ *ом*, сопротивление кенотрона $R_{i\,пост} = 175$ *ом*. Требуется определить: площадь поперечного сечения сердечника S, числа витков обмоток w_1, w_2, w_3, w_4 и диаметры проводов всех обмоток: d_1, d_2, d_3 и d_4, если сердечник сделан из обычной трансформаторной стали, допускающей магнитную индукцию $B = 7\,500$ *гс*.

Решение. Потребляемая от сети мощность согласно формуле (7-3) равна

$$P = 1{,}25\,[I_0U_0 + I_3U_3 + I_4U_4 + I_0^2(R_{др} + R_{i\,пост})] = 1{,}25\,(300\cdot 0{,}1 + 5\cdot 2 + 6{,}3\cdot 2 + 0{,}01\cdot 375) \approx 70 \text{ вт}.$$

Площадь поперечного сечения сердечника согласно формуле (7-1) $S = 1,2\sqrt{70} = 10$ *см²*.

Число витков на вольт [формула (7-4)] $w_0 = \frac{450\,000}{7\,500 \cdot 10} = 6$.

Отсюда согласно формуле (7-5) получаем:
$w_1 = 220 \cdot 6 = 1\,320$; $w_2 = 300 \cdot 6 = 1\,800$; $w_3 = 5 \cdot 6 = 30$ и $w_4 = 6,3 \cdot 6 = 38$ витков.

Ток в первичной обмотке вычисляем по формуле

$$I_1 = \frac{P}{U_1} = \frac{70}{220} \approx 0,32 \ a$$

Наконец, по формуле (7-6) определяем диаметры проводов

$$d_1 = 0,8\sqrt{0,32} \approx 0,45 \ мм; \ d_2 = 0,8\sqrt{0,1} \approx 0,25 \ мм; \ d_3 = d_4 = 0,8\sqrt{2} = 1,1 \ мм.$$

7-2. Допустимая в сердечнике силового трансформатора магнитная индукция $B = 8\,000$ *гс*. Напряжение сети $U_1 = 220$ *в*. Трансформатор работает в схеме двухполупериодного выпрямления и при выпрямленном токе $I_0 = 80$ *ма* напряжение на повышающей обмотке $2U_2 = 2 \cdot 440$ *в*.

Определить: 1) площадь сечения сердечника S; 2) величину тока в первичной обмотке I_1; 3) числа витков обеих обмоток w_1 и w_2; 4) диаметр провода обеих обмоток.

Ответ: $S = 8$ *см²*; $w_1 = 1\,550$; $2w_2 = 2 \times 3\,100$; $I_1 = 0,2$ *а*; $d_1 = 0,36$ *мм*; $d_2 = 0,23$ *мм*.

Автотрансформатор. Упрощенный расчет автотрансформаторов ведется по формулам расчета трансформатора, но формула (7-1) принимает вид

$$S = 1,2\sqrt{P(1 - n)} \qquad (7\text{-}7)$$

для понижающего автотрансформатора (фиг. 7-1,*в*) и

$$S = 1,2\sqrt{P\left(1 - \frac{1}{n}\right)} \qquad (7\text{-}8)$$

для повышающего автотрансформатора (фиг. 7-1,*б*).

Кроме того, токи в цепях автотрансформатора связаны соотношением

$$I_c = I_н \pm I,$$

где I_c — ток в первичной цепи (потребляемый от сети);
$I_н$ — ток во вторичной цепи (ток нагрузки);
I — ток в части обмотки, являющейся общей для обеих цепей.

Знак (+) берется для повышающего, а (—) — для понижающего автотрансформатора.

Примеры и задачи.

7-3. Требуется рассчитать автотрансформатор, повышающий напряжение со 110 на 220 *в* и имеющий мощность $P_0 = 70$ *вт*. Магнитная индукция в сердечнике $B = 10\,000$ *гс*.

Решение. Так как автотрансформатор—повышающий, то при коэффициенте трансформации $n = 2$

$$S = 1,2\sqrt{1,25P_0\left(1 - \frac{1}{n}\right)} = 1,2\sqrt{1,25\frac{70}{2}} = 1,2\sqrt{44} = 8 \ см^2.$$

Число витков на вольт равно

$$w_0 = \frac{450\,000}{10\,000 \cdot 8} = 5,7.$$

Числа витков обмоток равны:
$w_1 = 110 \cdot 5,7 \approx 630$ витков (сетевая часть обмотки):
$w_2 = 630$ витков (повышающая часть обмотки).

Находим токи в частях обмотки

$$I_н = \frac{P_0}{U} = \frac{70}{220} = 0,32 \ a.$$

Этот ток проходит через часть обмотки $w_2 - w_1$.

$$\text{Ток } I_c = \frac{1,25P_0}{U} = \frac{1,25 \cdot 70}{110} = 0,8 \ a.$$

В части обмотки w_1 ток равен $I_1 = I_c - I_н = 0,8 - 0,32 = 0,48$ *а*.

Диаметр провода частей обмотки равен:

$$d_1 = 0,8\sqrt{0,48} = 0,56 \ мм; \quad d_2 = 0,8\sqrt{0,32} = 0,45 \ мм.$$

Таким образом, диаметр провода сетевой части обмотки автотрансформатора меньше, чем в случае сетевой обмотки обычного трансформатора.

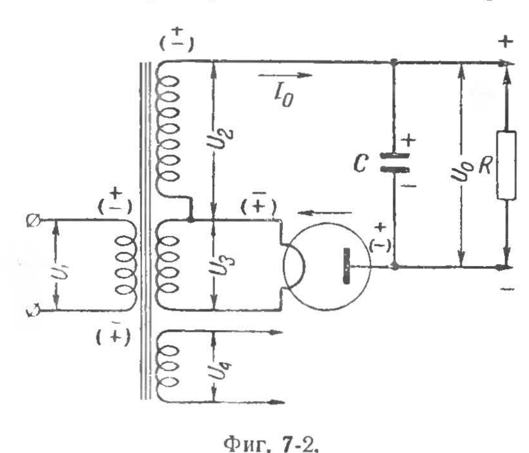
7-4. Рассчитать автотрансформатор, понижающий напряжение со 127 на 36 *в* и имеющий мощность 60 *вт*. Магнитная индукция $B = 5\,000$ *гс*.

Ответ: $S = 9$ *см*²; $w_1 = 1\,270$ витков;

$w_2 = 360$ витков; $d_1 = 0{,}62$ *мм*;
$d_2 = 0{,}8$ *мм*.

2. ЛАМПОВЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

Среднее значение выпрямленного напряжения для однополупериодного выпрямителя



Фиг. 7-2.

(фиг. 7-2) при отсутствии конденсатора C вычисляется по формуле

$$U_{ср} = \frac{1}{\pi} U_a = 0{,}318\, U_a, \tag{7-9}$$

где U_a — амплитудное значение переменного напряжения.

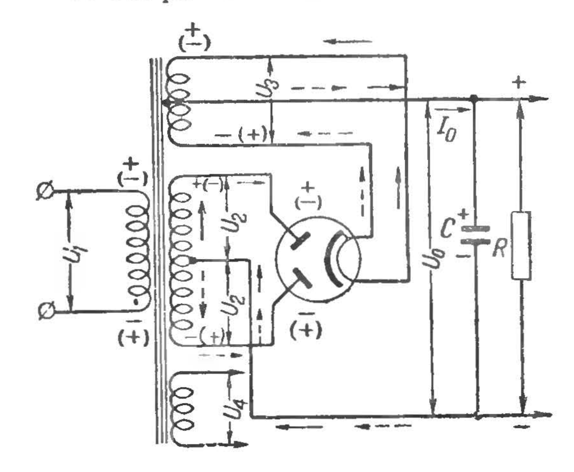
Среднее значение выпрямленного напряжения при двухполупериодном выпрямлении (фиг. 7-3) при отсутствии зарядного конденсатора вычисляется по формуле

$$U_{ср} = \frac{2}{\pi} U_a = 0{,}636\, U_a. \tag{7-10}$$

Амплитуда первой гармоники пульсаций выпрямленного напряжения вычисляется по приближенной формуле

$$U_{a1} = \frac{I_0}{4f'C} = \frac{U_0}{4f'RC}, \tag{7-11}$$

где I_0 — выпрямленный постоянный ток, *а*;
C — емкость конденсатора, *ф*;
U_0 — выпрямленное напряжение, *в*;
R — нагрузочное сопротивление, *ом*;
f' — частота пульсаций, которая при частоте сети 50 *гц* равна 50 *гц* для однополупериодного выпрямления и 100 *гц* — для двухполупериодного выпрямления.



Фиг. 7-3.

Коэффициент пульсаций, равный $\frac{U_{a1}}{U_0}$, вычисляется по формуле

$$\Delta U\% \approx \frac{25 \cdot 10^6}{f'RC}, \tag{7-12}$$

где f' — частота пульсаций, *гц*;
R — нагрузочное сопротивление выпрямителя, *ом*;
C — емкость, *мкф*.

Примеры и задачи.

7-5. Выпрямленный ток при однополупериодном выпрямлении $I_0 = 45$ *ма*. Чему равно напряжение пульсаций, если емкость конденсатора $C = 8$ *мкф*?

Ответ: 28,2 *в*.

7-6. Двухполупериодный выпрямитель работает при напряжении повышающей обмотки 2×300 *в*. Частота сети $f = 50$ *гц*. а) Чему равно среднее значение выпрямленного напряжения при отсутствии зарядного конденсатора? б) Чему равно напряжение пульсаций, если выпрямленный ток $I_0 = 100$ *ма*, а емкость конденсатора $C = 4$ *мкф*?

Решение.

$$U_{ср} = 0{,}636 \cdot 300 \cdot 1{,}41 = 270\ в;$$

$$U_{a1} = \frac{0{,}1}{4 \cdot 100 \cdot 4 \cdot 10^{-6}} = 62{,}5\ в.$$

7-7. Какое напряжение должна иметь повышающая обмотка силового трансформатора двухполупериодного выпрямителя, чтобы среднее значение выпрямленного напряжения было $U_{ср} = 500$ *в*?

Ответ: 2×555 *в*.

7-8. Высоковольтный однополупериодный выпрямитель для электронно-лучевого осциллографа, работающий от сети с частотой 50 *гц*, дает 1 000 *в* выпрямленного напряжения при токе в 1 *ма*. Определить, какую емкость на выходе должен иметь выпрямитель, чтобы коэффициент пульсаций был не более 2%?

Ответ: 0,025 *мкф*.

3. СГЛАЖИВАЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ

Коэффициент фильтрации однозвенного фильтра, состоящего из дросселя L и конденсатора C (фиг. 7-4), равен

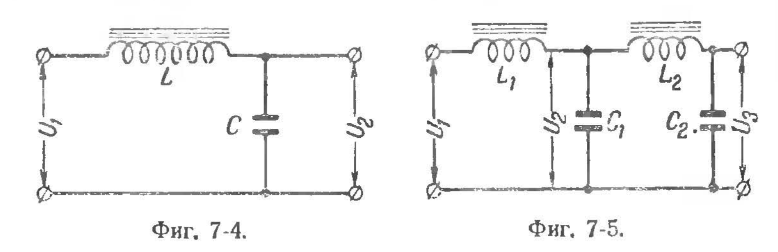
$$a = \frac{U_1}{U_2} = \omega^2 LC - 1 \approx \omega^2 LC, \qquad (7\text{-}13)$$

где U_1 — амплитуда переменной составляющей на входе фильтра;

U_2 — амплитуда переменной составляющей на выходе фильтра.

При этом предполагается, что активное сопротивление $R_{др}$ дросселя мало по сравнению с его индуктивным сопротивлением ωL.

Необходимо отметить, что из расчета определяется действующая индуктивность дросселя. При изготовлении дросселя необходимо учесть, что индуктивность падает с увеличением выпрямленного тока (гл. 8, 1).



Фиг. 7-4. Фиг. 7-5.

Коэффициент фильтрации двухзвенного фильтра L и C (фиг. 7-5)

$$a = a_1 a_2, \qquad (7\text{-}14)$$

где

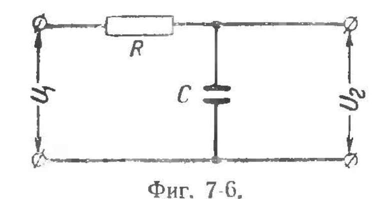
$$a_1 = \frac{U_1}{U_2} \approx \omega^2 L_1 C_1 \quad и \quad a_2 = \frac{U_2}{U_3} = \omega^2 L_2 C_2.$$

Коэффициент фильтрации однозвенного фильтра, состоящего из активного сопротивления R и конденсатора C (фиг. 7-6), равен

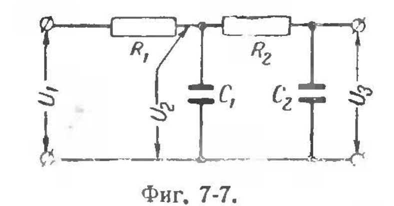
$$a = \frac{U_1}{U_2} = \sqrt{(\omega RC)^2 + 1} \approx \omega RC. \qquad (7\text{-}15)$$

Коэффициент фильтрации двухзвенного фильтра из R и C (фиг. 7-7) определяется по формуле (7-14), но в этом случае

$$a_1 \approx \omega R_1 C_1; \quad a_2 \approx \omega R_2 C_2.$$



Фиг. 7-6.



Фиг. 7-7.

Примеры и задачи.

7-9. К однополупериодному выпрямителю (фиг. 7-2), который при частоте сети $f=50$ *гц* дает напряжение пульсаций $U_1=20$ *в*, приключен фильтр, состоящий из дросселя с индуктивностью 30 *гн* и конденсатора емкостью 16 *мкф*. Определить: а) коэффициент фильтрации; б) величину напряжения пульсаций после фильтра.

Ответ: а) 48: б) 0,43 *в*.

7-10. Двухзвенный фильтр двухполупериодного выпрямителя состоит из двух дросселей с одинаковой индуктивностью L и двух конденсаторов с одинаковой емкостью $C=8$ *мкф* каждый. Коэффициент фильтрации $a=1\,000$. Частота сети —50 *гц*. Определить индуктивность дросселей.

Решение.

$$a=\alpha_1\alpha_2=\omega^2LC\cdot\omega^2LC=(\omega^2LC)^2,$$

ткуда

$$L=\frac{\sqrt{a}}{\omega^2C}=\frac{\sqrt{1\,000}}{4\cdot10^4\pi^2\,8\cdot10^{-6}}=\frac{31{,}6}{0{,}32\pi^2}\approx 10\text{ гн}.$$

7-11. Двухзвенный фильтр, состоящий из двух конденсаторов одинаковой емкости и двух сопротивлений $R_1=10\,000$ *ом* и $R_2=20\,000$ *ом*, должен понизить напряжение пульсаций с частотой $f'=100$ *гц* от 0,1 *в* до 50 *мкв*. Какую емкость должны иметь конденсаторы?

Ответ: ≈ 5 *мкф*.

7-12. Двухполупериодный выпрямитель дает 300 *в* выпрямленного напряжения. Напряжение пульсаций равно 0,8 *в*. От выпрямителя через однозвенный фильтр RC питается усилитель, анодное напряжение которого должно быть 200 *в* при анодном токе 4 *ма*, а напряжение пульсаций должно быть не больше, чем 4 *мв*. Определить величины R и C фильтра. Частота сети $f=50$ *гц*.

Ответ: $R\approx 25\,000$ *ом*; $C\approx 13$ *мкф*.

7-13. Двухзвенный фильтр, имеющий дроссели с индуктивностью по 10 *гн* каждый и емкости 6 и 8 *мкф*, приключен к однополупериодному выпрямителю, который работает от сети $f=50$ *гц* и дает напряжение пульсаций 60 *в*. Определить: а) общий коэффициент фильтрации, б) напряжение пульсаций после фильтра.

Ответ: а) ≈ 48; б) $\approx 1{,}25$ *в*.

4. ТВЕРДЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

Допускаемое обратное напряжение на один элемент купроксного выпрямителя равно приблизительно 5—6 *в* при плотности тока приблизительно $I_0=20$—40 *ма/см²*.

Допустимое обратное напряжение на один элемент селенового выпрямителя равно 15—18 *в* при плотности тока $I_0=20$—25 *ма/см²*.

Допустимый ток через элемент твердого выпрямителя вычисляется по формуле

$$I=0{,}78I_0(D^2-d^2), \qquad (7\text{-}16)$$

где D и d — соответственно наибольший и наименьший диаметры выпрямляющего слоя, *см*.

Для получения больших выпрямленных токов и напряжений элементы твердых выпрямителей соединяются в параллельные и последовательные группы.

При расчете числа элементов для выпрямителя с конденсатором на входе сглаживающего фильтра надо учитывать, что в обычных схемах однополупериодного и двухполупериодного выпрямлений обратное напряжение равно примерно двойному выпрямленному напряжению.

Задачи.

7-14. Требуется собрать однополупериодный селеновый выпрямитель с фильтром для приемника. Сколько понадобится селеновых элементов, имеющих $D=3$ *см* и $d=0{,}6$ *см*, если выпрямленное напряжение и ток должны быть соответственно 300 *в* и 100 *ма*? Как должны быть включены элементы?

Ответ: Не менее 33 элементов, соединенных последовательно.

7-15. Требуется собрать однополупериодный выпрямитель без фильтра для зарядки кислотного аккумулятора на 6 *в* и 80 *ач*. Если применить купроксные элементы, имеющие $D = 5$ *см* и $d = 1{,}2$ *см*, то сколько элементов нужно взять и как их соединить?

Ответ: 16 элементов: две последовательно соединенные группы по восемь элементов параллельно в каждой группе.

7-16. Как осуществить зарядку аккумулятора для случая предыдущей задачи, если напряжение сети переменного тока равно 220 *в*?

Ответ: Так как в конце заряда на каждый элемент аккумулятора необходимо зарядное напряжение 2,4 — 2,7 *в*, то, учитывая падение напряжения в выпрямительных элементах, следует применить понижающий трансформатор или автотрансформатор на 12 *в* мощностью приблизительно 100 *вт*.

ГЛАВА ВОСЬМАЯ

РАЗНОЕ

1. ТРАНСФОРМАТОРЫ И ДРОССЕЛИ С ПОДМАГНИЧИВАНИЕМ

При небольшом переменном токе, когда число переменных ампервитков на 1 *см* длины пути магнитного потока не более 0,1 *ав/см*, индуктивность определяется по формуле (1-22). Величина μ берется порядка 400, если постоянный подмагничивающий ток отсутствует, а если через обмотку проходит подмагничивающий ток, то μ определяется из табл. 8-1.

Таблица 8-1

Постоянные подмагничивающие ампервитки $aw_0/см$	0,1	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5
μ	400	375	300	250	200	170	140	125	110	100

Пример 8-1. Междуламповый трансформатор с сердечником из пластин Ш-12 имеет в первичной обмотке 3 000 витков. Площадь поперечного сечения сердечника $S = 3$ *см*². Через обмотку проходит постоянный ток $I_0 = 1$ *ма*. Определить: а) μ; б) индуктивность обмотки.

Решение. а) Число постоянных ампервитков на 1 *см* равно

$$aw_0/см = I_0 \frac{w}{l}.$$

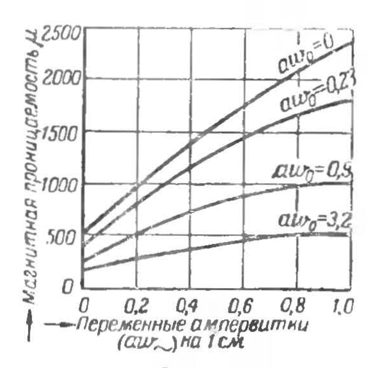
Средняя длина магнитопровода для пластин Ш-12 равна 5,4 *см*.

Тогда $aw_0/см = 1 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{3\,000}{5{,}4} = 0{,}56$ *ав/см*.

Из табл. 8-1 находим $\mu \approx 368$.

б) $L = \frac{1{,}256\, w^2 S \mu}{l} \cdot 10^{-8}$ *гн* $= \frac{1{,}256 \cdot 3^2 \cdot 10^6 \cdot 3 \cdot 368}{5{,}4} \cdot 10^{-8} = 23$ *гн*.

При относительно больших переменных ампервитках ($aw_\sim/см = 0{,}1 — 1{,}0$) и наличии постоянных подмагничивающих ампервитков для обычной трансформаторной стали μ приблизительно можно определить из кривых фиг. 8-1.



Фиг. 8-1.

Пример 8-2. Трансформатор имеет в первичной обмотке 1 800 витков. Сердечник собран из пластин Ш-16. Площадь поперечного сечения сердечника $S = 2{,}6$ *см*². Средняя длина магнитопровода $l = 9{,}6$ *см*.

Определить индуктивность первичной обмотки, если постоянная составляющая тока равна 2 *ма*, а переменная составляющая — 0,85 *ма*.

Решение.

$$\frac{aw_\sim}{l} = \frac{0{,}85 \cdot 10^{-3} \cdot 1\,800}{9{,}6} = 0{,}16 \text{ ав};$$

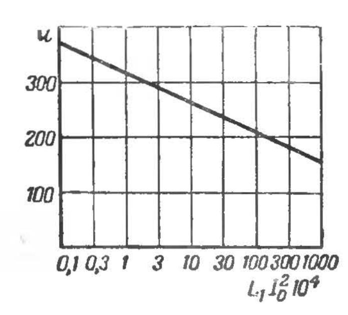
$$\frac{aw_0}{l} = \frac{2 \cdot 10^{-3} \cdot 1\,800}{9{,}6} = 0{,}374 \text{ ав}$$

Из кривых фиг. 8-1 находим, что μ приблизительно равно 600. Тогда

$$L=\frac{1{,}256\cdot 1\,800^2\cdot 2{,}6\cdot 600}{9{,}6}\cdot 10^{-8}=6{,}6\ гн.$$

Примечание. Практически приходится по заданной индуктивности определять число витков обмотки. Эта задача может быть решена подбором числа витков, так чтобы $\frac{aw_{\infty}}{l}$ и $\frac{aw_0}{l}$ и соответствующее им значение μ обеспечивали заданную индуктивность.

При больших значениях постоянных ампервитков трансформаторы и дроссели необходимо делать с воздушным зазором, оптимальная величина которого приближенно определяется формулой



Фиг. 8-2.

$$l_з=(10\,l+aw_0)\cdot 10^{-4}\ см, \qquad (8\text{-}1)$$

где $l_з$ и l — в сантиметрах.

Ориентировочное значение μ при оптимальном воздушном зазоре можно определить из графика фиг. 8-2.

Пример 8-3. Выходной трансформатор на сердечнике Ш-10 с площадью поперечного сечения $S=3{,}3\ см^2$ и средней длиной магнитопровода $l=16\ см$ имеет индуктивность первичной обмотки $L_1=6\ гн$. Постоянный подмагничивающий ток $I_0=20\ ма$. Определить: а) оптимальную величину воздушного зазора; б) число витков первичной обмотки.

Решение

$$L_1 I_0^2\cdot 10^4=6\cdot 20^2\cdot 10^{-6}\cdot 10^4=24.$$

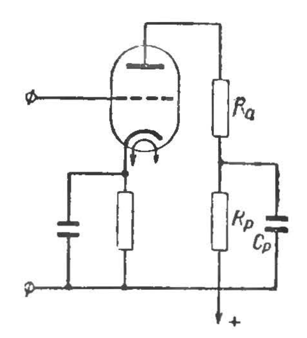
Из графика фиг. 8-2 находим $\mu\approx 245$. Из формулы (1-22) находим число витков

$$w=\sqrt{\frac{L\cdot l\cdot 10^8}{1{,}256\,\mu S}}=\sqrt{\frac{6\cdot 16\cdot 10^8}{1{,}256\cdot 245\cdot 3{,}3}}\approx 3\,100\ витков;$$

$$l_з=(10\cdot 16+20\cdot 10^{-3}\cdot 3\,100)\,10^{-4}=0{,}022\ см=0{,}22\ мм.$$

2. РАЗВЯЗЫВАЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ

Для уменьшения обратной связи между каскадами через источники питания применяются развязывающие фильтры. Простейший анодный развязывающий фильтр показан на фиг. 8-3. Емкость C_p должна быть выбрана так, чтобы ее сопротивление переменному току низшей частоты было намного меньше, чем сумма развязывающего сопротивления R_p и сопротивления источника питания R_n.



Фиг. 8-3.

Коэффициент фильтрации, характеризующий степень развязывания, определяется как

$$a=\frac{R_p+R_n}{X_C}. \qquad (8\text{-}2)$$

Так как обычно R_n намного меньше R_p, то

$$a\approx\frac{R_p}{X_C}=6{,}28\cdot 10^{-6} f C_p R_p, \qquad (8\text{-}3)$$

где C_p — *мкф*;
R_p — *ом*.

Величина R_p обычно выбирается порядка $R_p=0{,}2R_a$, C_p берется от 0,25 до 8 *мкф* для низкочастотных усилителей и от 0,01 до 0,1 *мкф* для усилителей промежуточной и высокой частот.

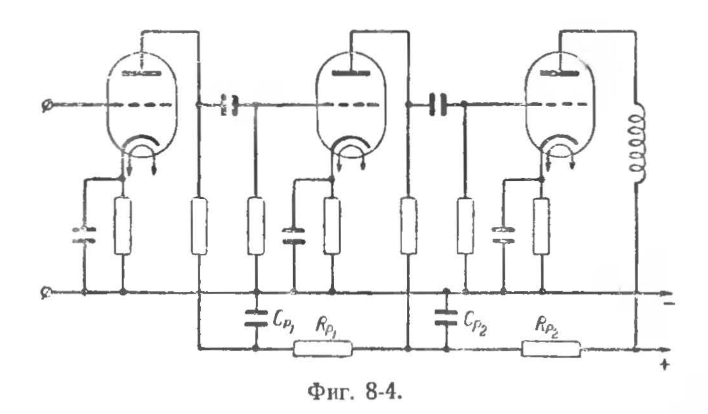
В случае трехкаскадного усилителя по схеме фиг. 8-4 общий коэффициент фильтрации равен

$$a=a_1 a_2. \qquad (8\text{-}4)$$

Задачи.

8-4. Развязывающий фильтр состоит из емкости $C_p=1\ мкф$ и сопротивления $R_p=50\cdot 10^3\ ом$. Чему равен коэффициент фильтрации при $f=100\ гц$?

Ответ: 31,4.



Фиг. 8-4.

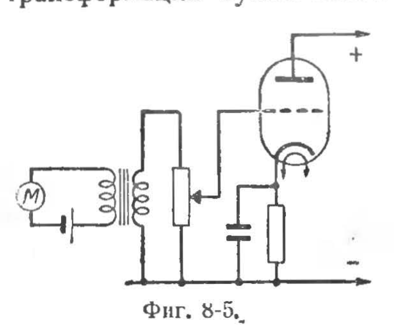
8-5. Развязывающие фильтры усилителя по схеме фиг. 8-4 имеют данные предыдущей задачи. Определить общий коэффициент фильтрации.

Ответ: 985.

3. МИКРОФОНЫ

Задачи.

8-6. Активное сопротивление звуковой катушки микрофона типа ДМК равно 11 *ом*. С каким коэффициентом трансформации нужно взять микрофонный трансформатор, если микрофон работает на линию с сопротивлением 600 *ом*?



Фиг. 8-5.

Ответ: $n=7{,}4$.

8-7. Микрофон ММ-2 включен по схеме фиг. 8-5 и развивает напряжение с амплитудой 4 *мв*. Определить: а) коэффициент трансформации микрофонного трансформатора, если на сетку лампы микрофонного усилителя необходимо подать напряжение с амплитудой 100 *мв*? б) какой должен быть коэффициент усиления напряжения, чтобы на нагрузочном сопротивлении в 3 500 *ом* оконечного каскада получить мощность 8 *вт*?

Ответ: а) 25; б) 2366.

4. ЗВУКОСНИМАТЕЛИ И ПРОИГРЫВАТЕЛИ

Эффективное напряжение, развиваемое электромагнитным звукоснимателем (фиг. 8-6), подсчитывается по формуле

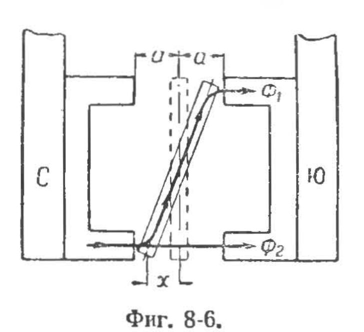
$$U=4{,}44wf\Phi_м\cdot\frac{x_м}{2a}10^{-8}\ в, \qquad (8\text{-}5)$$

где w — число витков катушки;
f — частота колебаний якоря, *гц*;
$\Phi_м$ — максимальный магнитный поток, *мкс*;
$x_м$ — наибольшее смещение якоря, *мм*;
a — ширина воздушного зазора между якорем и полюсным наконечником, *мм*.

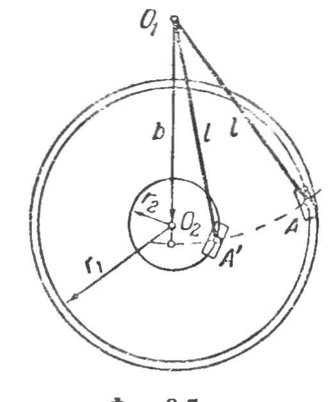
Давление иглы на бороздки пластинки определяется по формуле

$$p=\frac{P}{S}, \qquad (8\text{-}6)$$

где p — давление, *кг/см²*;
P — сила, с которой давит на бороздку игла, *кг*;
S — поверхность соприкосновения иглы с бороздкой, *см²*.



Фиг. 8-6.



Фиг. 8-7.

Расчет положения центра вращения тонарма звукоснимателя в соответствии с фиг. 8-7 производится по формуле

$$b=\sqrt{l^2-r_1r_2}, \qquad (8\text{-}7)$$

где l — рабочая длина тонарма (от центра вращения тонарма до центра крепления иглы);

r_1 — наибольший и r_2 — наименьший радиусы записанной части пластинки.

Вращающий момент мотора $M_{вр}$ (*г-см*), потребляемая от сети мощность P (*вт*), число оборотов в минуту n и к. п. д. η мотора связаны соотношением

$$M_{вр} = \eta \frac{P}{n} \cdot 97\,300 \text{ г-см}. \qquad (8\text{-}8)$$

Примеры и задачи.

8-8. Катушка электромагнитного звукоснимателя имеет 1 500 витков. Максимальный магнитный поток равен 4 500 *мкс*; воздушный зазор равен 0,75 *мм*. Определить величину напряжения на зажимах катушки при частоте $f = 50$ *гц* и максимальном смещении якоря 0,1 *мм*.

Ответ: 1,0 *в*.

8-9. Определить давление иглы на бороздку, если поверхность соприкосновения иглы с бороздкой равна 0,005 *мм*², а сила, с которой игла давит на бороздку, равна 100 *г*.

Ответ: 2 000 *кг/см*².

8-10. Размеры патефонной части приемника требуют, чтобы центр вращения тонарма находился на расстоянии не более 250 *мм* от центра пластинки. Определить рабочую длину тонарма, если наибольший и наименьший радиусы записанной части пластинки соответственно равны 150 и 50 *мм*.

Решение. Из формулы (8-7)

$$l = \sqrt{b^2 + r_1 r_2} = \sqrt{625 + 75} = \sqrt{700} = 26{,}5 \text{ см} = 265 \text{ мм}.$$

Таким образом, тонарм должен быть установлен так, чтобы иголка находилась на расстоянии $265 - 250 = 15$ *мм* за центром вращения пластинки.

8-11. Определить мощность, потребляемую патефонным мотором, если $n = 78$ об/мин, $M_{вр} = 2\,000$ *г-см* и к. п. д. $\eta = 12\%$.

Ответ: $P = 13{,}3$ *вт*.

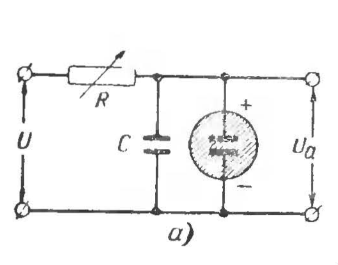
5. ГЕНЕРАТОР РАЗВЕРТКИ С НЕОНОВОЙ ЛАМПОЙ

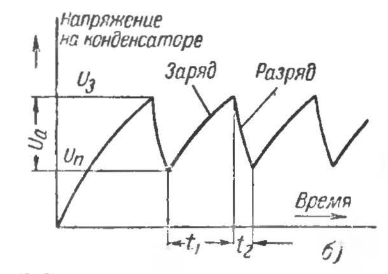
Для простого генератора развертки по схеме фиг. 8-8,*а* частота и амплитуда пилообразного напряжения (фиг. 8-8,*б*) вычисляются по формулам

$$f \approx \frac{1}{2{,}3RC \lg \dfrac{U - U_п}{U - U_з}}; \qquad (8\text{-}9)$$

$$U_a = U_з - U_п, \qquad (8\text{-}10)$$

где f — частота пилообразных колебаний, *гц*;
R — зарядное сопротивление, *ом*;
C — емкость, *ф*;
U — напряжение источника постоянного тока, *в*;
$U_з$ — напряжение зажигания, *в*;
$U_п$ — напряжение погасания неоновой лампы, *в*;
U_a — амплитуда пилообразного напряжения, *в*.





Фиг. 8-8.

Примеры и задачи.

8-12. Требуется получить пилообразное напряжение с частотой 600 *гц* от генератора с неоновой лампой. Зарядное сопротивление равно 0,1 *мгом*; напряжение источника постоянного тока — 200 *в*; напряжение зажи-

гания и погасания соответственно равны 150 и 145 *в*. Определить: а) амплитуду пилообразного напряжения; б) емкость конденсатора C.

Решение.

а) $U_a = 150 - 145 = 5$ *в*.

б) Согласно формуле (8-9)

$$C = \frac{1}{2{,}3\cdot 10^5\cdot 600\cdot \lg\frac{200-145}{200-150}} = \frac{1}{13{,}8\cdot 10^7 \lg\frac{55}{50}}.$$

Величина логарифма подсчитывается по таблицам следующим образом: $\lg\frac{55}{50} = \lg 55 - \lg 50 = 1{,}7404 - 1{,}699 = 0{,}0405$.

Тогда $C = 0{,}18$ *мкф*.

8-13. Генератор развертки по схеме фиг. 8-8,*а* имеет следующие данные: $R = 0{,}2$ *мгом*, $C = 0{,}1$ *мкф*, $U_з = 87$ *в*, $U_п = 80$ *в*, $U = 110$ *в*. Определить: а) амплитуду и б) частоту пилообразного напряжения.

Ответ: а) $U_a = 7$ *в*; б) $f \approx 188$ *гц*.

6. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ТРУБКИ

Чувствительность электронно-лучевой трубки по вертикальному или горизонтальному отклонению определяется как

$$x = \frac{l}{U} \text{ мм/в}, \qquad (8\text{-}11)$$

где l — величина отклонения луча от первоначального положения, *мм*;

U — напряжение на отклоняющих пластинах, *в*.

Задачи.

8-14. Чувствительность электронно-лучевой трубки 5Л01В (Л0738, 2АР1) при $U_{a2} = 500$ *в* равна по горизонтальному отклонению 0,22 *мм/в* и по вертикальному отклонению 0,26 *мм/в*. а) Какое напряжение нужно подать на вертикально-отклоняющие пластины, чтобы получить отклонение луча $l = 45$ *мм*? б) Какое напряжение нужно

подать на горизонтально-отклоняющие пластины, чтобы получить то же отклонение луча?

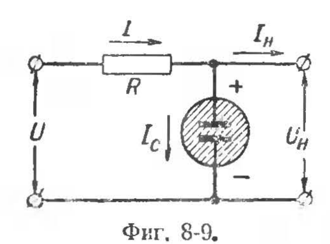
Ответ: а) ≈ 173 *в*; б) ≈ 204 *в*.

8-15. Трубка задачи 8-14 используется для осциллографа, у которого чувствительности по вертикальному и горизонтальному отклонениям должны быть равными соответственно 40 и 8 *мм/в*. Какие коэффициенты усиления должны иметь усилители по вертикальному и горизонтальному отклонениям?

Ответ: 154 и 36,4.

7. СТАБИЛИЗАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ (СТАБИЛИВОЛЬТЫ)

Стабиливольт включается по схеме фиг. 8-9. Изменение напряжения на нагрузочном сопротивлении в зависимости от изменения напряжения источника постоянного тока определяется по формуле



Фиг. 8-9.

$$\Delta U_н = \frac{R_i}{R}\Delta U, \qquad (8\text{-}12)$$

где R_i — внутреннее сопротивление стабиливольта для переменного тока в рабочем участке, которое при малых изменениях напряжения обычно лежит в пределах 20—150 *ом*;

R — ограничивающее сопротивление, определяемое как

$$R = \frac{U - U_н}{I_н + I_c}. \qquad (8\text{-}13)$$

Здесь U — среднее (нормальное) напряжение источника тока, *в*;

$I_н$ — нормальный ток нагрузки, *а*;

I_c — средний рабочий ток стабилизатора, *а*.

Стабилизация тем лучше, чем больше R, или, иначе — чем больше U.

Пример и задача.

8-16. Для стабилизации применен стабиливольт 150С5-30. Напряжение источника тока $U = 300$ *в*. Определить, какое необходимо включить ограничивающее сопротивление R, если нормальный рабочий ток стабиливольта $I_c = 20$ *ма*, а ток через нагрузку $I_н = 8$ *ма*.

Решение. Напряжение на нагрузочном сопротивлении $U_н = 150$ *в*. Тогда

$$R = \frac{300 - 150}{(20 + 8) \cdot 10^{-3}} = 5\,360 \text{ ом}.$$

8-17. В каких пределах будет изменяться напряжение на нагрузочном сопротивлении в случае задачи 8-16, если напряжение источника тока изменяется в пределах 300 ± 30 *в*, а R_i стабиливольта равно 100 *ом*?

Ответ: $150 \pm 0{,}56$ *в*.

Приложение 1

ТАБЛИЦА ВАЖНЕЙШИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Величина и ее обозначение	Основная единица и ее обозначение	Производные единицы и их обозначения
Ток (I)	Ампер (*а*)	Миллиампер (*ма*) $= 10^{-3}$ *а* Микроампер (*мка*) $= 10^{-6}$ *а*
Заряд (q)	Кулон (*к*)	
Электродвижущая сила (E) и напряжение (U)	Вольт (*в*)	Милливольт (*мв*) $= 10^{-3}$ *в* Микровольт (*мкв*) $= 10^{-6}$ *в* Киловольт (*кв*) $= 10^{3}$ *в*
Сопротивление (R)	Ом (*ом*)	Килоом (*ком*) $= 10^{3}$ *ом* Мегом (*мгом*) $= 10^{6}$ *ом*
Емкость (C)	Фарада (*ф*)	Микрофарада (*мкф*) $= 10^{-6}$ *ф* Пикофарада (*пф*) или микромикрофарада (*мкмкф*) $= 10^{-12}$ *ф* Сантиметр (*см*) $= 1{,}11$ *мкмкф* (в настоящее время почти не применяется)
Индуктивность (L) и взаимоиндуктивность (M)	Генри (*гн*)	Миллигенри (*мгн*) $= 10^{-3}$ *гн* Микрогенри (*мкгн*) $= 10^{-6}$ *гн*
Магнитный поток (Φ)	Максвелл (*мкс*)	
Магнитная индукция (B)	Гаусс (*гс*)	
Мощность (P)	Ватт (*вт*)	Милливатт (*мвт*) $= 10^{-3}$ *вт* Киловатт (*квт*) $= 10^{3}$ *вт*

Величина и ее обозначение	Основная единица и ее обозначение	Производные единицы и их обозначения
Энергия (W)	Ватт-секунда (*вт-сек*)	Ватт-час (*втч*) = 3 600 *вт-сек* Гектоватт-час (*гвтч*) = 100 *втч* Киловатт-час (*квтч*) = 1 000 *втч*
Частота (f)	Герц (*гц*)	Килогерц (*кгц*) = 10^3 *гц* Мегагерц (*мгц*) = 10^6 *гц*
Период (T) и время (t)	Секунда (сек.)	
Длина волны (λ)	Метр (*м*)	Дециметр (*дм*) Сантиметр (*см*) Миллиметр (*мм*)

Длина электромагнитной волны (*м*) =

$$= \frac{\text{скорость распространения } (м/сек)}{\text{частота } (гц)} \text{ или}$$

$$\lambda_м = \frac{3 \cdot 10^8}{f_{гц}} = \frac{300\,000}{f_{кгц}} = \frac{300}{f_{мгц}}$$ [1]

Угловая частота (ω) или радиан в секунду

$$\omega = 2\pi f_{гц} = \frac{2\pi}{T_{сек.}}$$

[1] Скорость распространения электромагнитных волн равна приближенно $3 \cdot 10^8$ *м/сек* только при свободном распространении волн в вакууме или в неионизированном воздухе.

Приложение 2

НАТУРАЛЬНЫЕ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ

Угол	sin	tg	ctg	cos	Угол
0,0	0,0000	0,0000	∞	1,0000	90,0
0,5	0,0087	0,0087	114,60	0,9999	89,5
1,0	0,0175	0,0175	57,2900	0,9998	89,0
1,5	0,0262	0,0262	38,1900	0,9997	88,5
2,0	0,0349	0,0349	28,6400	0,9994	88,0
2,5	0,0436	0,0437	22,9000	0,9990	87,5
3,0	0,0523	0,0524	19,0800	0,9986	87,0
3,5	0,0610	0,0612	16,3500	0,9981	86,5
4,0	0,0698	0,0699	14,3000	0,9976	86,0
4,5	0,0785	0,0787	12,7100	0,9969	85,5
5,0	0,0872	0,0875	11,4300	0,9962	85,0
5,5	0,0958	0,0963	10,3850	0,9954	84,5
6,0	0,1045	0,1051	9,5144	0,9945	84,0
6,5	0,1132	0,1139	8,7769	0,9936	83,5
7,0	0,1219	0,1228	8,1443	0,9925	83,0
7,5	0,1305	0,1317	7,5958	0,9914	82,5
8,0	0,1392	0,1405	7,1154	0,9903	82,0
8,5	0,1478	0,1495	6,6912	0,9890	81,5
9,0	0,1564	0,1584	6,3138	0,9877	81,0
9,5	0,1650	0,1673	5,9758	0,9863	80,5
10,0	0,1736	0,1763	5,6713	0,9848	80,0
10,5	0,1822	0,1853	5,3955	0,9833	79,5
11,0	0,1908	0,1944	5,1446	0,9816	79,0
11,5	0,1994	0,2035	4,9152	0,9799	78,5
12,0	0,2079	0,2126	4,7046	0,9781	78,0
12,5	0,2164	0,2217	4,5107	0,9763	77,5
13,0	0,2250	0,2309	4,3315	0,9744	77,0
13,5	0,2334	0,2401	4,1653	0,9724	76,5
14,0	0,2419	0,2493	4,0108	0,9703	76,0
14,5	0,2504	0,2586	3,8667	0,9681	75,5
15,0	0,2588	0,2679	3,7321	0,9659	75,0
15,5	0,2672	0,2773	3,6059	0,9636	74,5
16,0	0,2756	0,2867	3,4874	0,9613	74,0
16,5	0,2840	0,2962	3,3759	0,9588	73,5
17,0	0,2924	0,3057	3,2709	0,9563	73,0
17,5	0,3007	0,3153	3,1716	0,9537	72,5
18,0	0,3090	0,3249	3,0777	0,9511	72,0
18,5	0,3173	0,3346	2,9887	0,9483	71,5
19,0	0,3256	0,3443	2,9042	0,9455	71,0
19,5	0,3338	0,3541	2,8239	0,9426	70,5
20,0	0,3420	0,3640	2,7445	0,9397	70,0
20,5	0,3502	0,3739	2,6746	0,9367	69,5
21,0	0,3584	0,3839	2,6051	0,9336	69,0
21,5	0,3665	0,3939	2,5386	0,9304	68,5
22,0	0,3746	0,4040	2,4751	0,9272	68,0
22,5	0,3827	0,4142	2,4142	0,9239	67,5

Угол	sin	tg	ctg	cos	Угол
23,0	0,3907	0,4245	2,3559	0,9205	67,0
23,5	0,3987	0,4348	2,2998	0,9171	66,5
24,0	0,4067	0,4452	2,2460	0,9135	66,0
24,5	0,4147	0,4557	2,1943	0,9100	65,0
25,0	0,4226	0,4663	2,1445	0,9063	65,0
25,5	0,4305	0,4770	2,0965	0,9026	64,5
26,0	0,4384	0,4877	2,0503	0,8988	64,0
26,5	0,4462	0,4986	2,0057	0,8949	63,5
27,0	0,4540	0,5095	1,9622	0,8910	63,0
27,5	0,4617	0,5206	1,9210	0,8870	62,5
28,0	0,4695	0,5317	1,8807	0,8829	62,0
28,5	0,4772	0,5430	1,8418	0,8788	61,5
29,0	0,4848	0,5543	1,8040	0,8746	61,0
29,5	0,4924	0,5658	1,7675	0,8704	60,5
30,0	0,5000	0,5774	1,7321	0,8660	60,0
30,5	0,5075	0,5890	1,6977	0,8616	59,5
31,0	0,5150	0,6009	1,6643	0,8572	59,0
31,5	0,5225	0,6128	1,6319	0,8526	58,5
32,0	0,5299	0,6249	1,6003	0,8480	58,0
32,5	0,5373	0,6371	1,5697	0,8434	57,5
33,0	0,5446	0,6494	1,5399	0,8387	57,0
33,5	0,5519	0,6619	1,5108	0,8339	56,5
34,0	0,5592	0,6745	1,4826	0,8290	56,0
34,5	0,5664	0,6873	1,4550	0,8241	55,5
35,0	0,5736	0,7002	1,4281	0,8192	55,0
35,5	0,5807	0,7133	1,4019	0,8141	54,5
36,0	0,5878	0,7265	1,3764	0,8090	54,0
36,5	0,5948	0,7400	1,3514	0,8039	53,5
37,0	0,6018	0,7536	1,3270	0,7986	53,0
37,5	0,6088	0,7673	1,3032	0,7934	52,5
38,0	0,6157	0,7813	1,2799	0,7880	52,0
38,5	0,6225	0,7954	1,2572	0,7826	51,5
39,0	0,6293	0,8098	1,2349	0,7771	51,0
39,5	0,6361	0,8243	1,2131	0,7716	50,5
40,0	0,6428	0,8391	1,1918	0,7660	50,0
40,5	0,6494	0,8541	1,1708	0,7604	49,5
41,0	0,6561	0,8693	1,1504	0,7547	49,0
41,5	0,6626	0,8847	1,1303	0,7490	48,5
42,0	0,6691	0,9004	1,1106	0,7431	48,0
42,5	0,6756	0,9163	1,0913	0,7373	47,5
43,0	0,6820	0,9325	1,0724	0,7314	47,0
43,5	0,6884	0,9490	1,0538	0,7254	46,5
44,0	0,6947	0,9657	1,0355	0,7193	46,0
44,5	0,7009	0,9827	1,0176	0,7133	45,5
45,0	0,7071	1,0000	1,0000	0,7071	45,0
Градусы	cos	ctg	tg	sin	Градусы

ЧЕТЫРЕХЗНАЧНЫЕ ЛОГАРИФМЫ

N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
100	0 000	0 004	0 009	0 013	0 017	0 022	0 026	0 030	0 035	0 039
101	0 043	0 048	0 052	0 056	0 060	0 065	0 069	0 073	0 077	0 082
102	0 086	0 090	0 095	0 099	0 103	0 107	0 111	0 116	0 120	0 124
103	0 128	0 133	0 137	0 141	0 145	0 149	0 154	0 158	0 162	0 166
104	0 170	0 175	0 179	0 183	0 187	0 191	0 195	0 199	0 204	0 208
105	0 212	0 216	0 220	0 224	0 228	0 233	0 237	0 241	0 245	0 249
106	0 253	0 257	0 261	0 265	0 269	0 273	0 278	0 282	0 286	0 290
107	0 294	0 298	0 302	0 306	0 310	0 314	0 318	0 322	0 326	0 330
108	0 334	0 338	0 342	0 346	0 350	0 354	0 358	0 362	0 366	0 370
109	0 374	0 378	0 382	0 386	0 390	0 394	0 398	0 402	0 406	0 410
110	0 414	0 418	0 422	0 426	0 430	0 434	0 438	0 441	0 445	0 449
11	0 414	0 453	0 492	0 531	0 569	0 607	0 645	0 682	0 719	0 755
12	0 792	0 828	0 864	0 899	0 934	0 969	1 004	1 038	1 072	1 106
13	1 139	1 173	1 206	1 239	1 271	1 303	1 335	1 367	1 399	1 430
14	1 461	1 492	1 523	1 553	1 584	1 614	1 644	1 673	1 703	1 732
15	1 761	1 790	1 818	1 847	1 875	1 903	1 931	1 959	1 987	2 014
16	2 041	2 068	2 095	2 122	2 148	2 175	2 201	2 227	2 253	2 279
17	2 304	2 330	2 355	2 380	2 405	2 430	2 455	2 480	2 504	2 529
18	2 553	2 577	2 601	2 625	2 648	2 672	2 695	2 718	2 742	2 765
19	2 788	2 810	2 833	2 856	2 878	2 900	2 923	2 945	2 967	2 989
20	3 010	3 032	3 054	3 075	3 096	3 118	3 139	3 160	3 181	3 201
21	3 222	3 243	3 263	3 284	3 304	3 324	3 345	3 365	3 385	3 404
22	3 424	3 444	3 464	3 483	3 502	3 522	3 541	3 560	3 579	3 598
23	3 617	3 636	3 655	3 674	3 692	3 711	3 729	3 747	3 766	3 784
24	3 802	3 820	3 838	3 856	3 874	3 892	3 909	3 927	3 945	3 962
25	3 979	3 997	4 014	4 031	4 048	4 065	4 082	4 099	4 116	4 133
26	4 150	4 166	4 183	4 200	4 216	4 232	4 249	4 265	4 281	4 298
27	4 314	4 330	4 346	4 362	4 378	4 393	4 409	4 425	4 440	4 456
28	4 472	4 487	4 502	4 518	4 533	4 548	4 564	4 579	4 594	4 609
29	4 624	4 639	4 654	4 669	4 683	4 698	4 713	4 728	4 742	4 757
30	4 771	4 786	4 800	4 814	4 829	4 843	4 857	4 871	4 886	4 900
31	4 914	4 928	4 942	4 955	4 969	4 983	4 997	5 011	5 024	5 038
32	5 051	5 065	5 079	5 092	5 105	5 119	5 132	5 145	5 159	5 172
33	5 185	5 198	5 211	5 224	5 237	5 250	5 263	5 276	5 289	5 302
34	5 315	5 328	5 340	5 853	5 366	5 378	5 391	5 403	5 416	5 428
35	5 441	5 453	5 465	5 478	5 490	5 502	5 514	5 527	5 539	5 551

N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
36	5 563	5 575	5 587	5 599	5 611	5 623	5 635	5 647	5 658	5 670
37	5 682	5 694	5 705	5 717	5 729	5 740	5 752	5 763	5 775	5 786
38	5 798	5 809	5 821	5 832	5 843	5 855	5 866	5 877	5 888	5 899
39	5 911	5 922	5 933	5 944	5 955	5 966	5 977	5 988	5 999	6 010
40	6 021	6 031	6 042	6 053	6 064	6 075	6 085	6 096	6 107	6 117
41	6 128	6 138	6 149	6 160	6 170	6 180	6 191	6 201	6 212	6 222
42	6 232	6 243	6 253	6 263	6 274	6 284	6 294	6 304	6 314	6 325
43	6 335	6 345	6 355	6 365	6 375	6 385	6 395	6 405	6 415	6 425
44	6 435	6 444	6 454	6 464	6 474	6 484	6 493	6 503	6 513	6 522
45	6 532	6 542	6 551	6 561	6 571	6 580	6 590	6 599	6 609	6 618
46	6 628	6 637	6 646	6 656	6 665	6 675	6 684	6 693	6 702	6 712
47	6 721	6 730	6 739	6 749	6 758	6 767	6 776	6 785	6 794	6 803
48	6 812	6 821	6 830	6 839	6 848	6 857	6 866	6 875	6 884	6 893
49	6 902	6 911	6 920	6 928	6 937	6 946	6 955	6 964	6 972	6 981
50	6 990	6 998	7 007	7 016	7 024	7 033	7 042	7 050	7 059	7 067
51	7 076	7 084	7 093	7 101	7 110	7 118	7 126	7 135	7 143	7 152
52	7 160	7 168	7 177	7 185	7 193	7 202	7 210	7 218	7 226	7 235
53	7 243	7 251	7 259	7 267	7 275	7 284	7 292	7 300	7 308	7 316
54	7 324	7 332	7 340	7 348	7 356	7 364	7 372	7 380	7 388	7 396
55	7 404	7 412	7 419	7 427	7 435	7 443	7 451	7 459	7 466	7 474
56	7 482	7 490	7 497	7 505	7 513	7 520	7 528	7 536	7 543	7 551
57	7 559	7 566	7 574	7 582	7 589	7 597	7 604	7 612	7 619	7 627
58	7 634	7 642	7 649	7 657	7 664	7 672	7 679	7 686	7 694	7 701
59	7 709	7 716	7 723	7 731	7 738	7 745	7 752	7 760	7 767	7 774
60	7 782	7 789	7 796	7 803	7 810	7 818	7 825	7 832	7 839	7 846
61	7 853	7 860	7 868	7 875	7 882	7 889	7 896	7 903	7 910	7 917
62	7 924	7 931	7 938	7 945	7 952	7 959	7 966	7 673	7 980	7 987
63	7 993	8 000	8 007	8 014	8 021	8 028	8 035	8 041	8 048	8 055
64	8 062	8 069	8 075	8 082	8 089	8 096	8 102	8 109	8 116	8 122
65	8 129	8 136	8 142	8 149	8 156	8 162	8 169	8 176	8 182	8 189
66	8 195	8 202	8 209	8 215	8 222	8 228	8 235	8 241	8 248	8 254
67	8 261	8 267	8 274	8 280	8 287	8 293	8 299	8 306	8 312	8 319
68	8 325	8 331	8 338	8 344	8 351	8 357	8 363	8 370	8 376	8 382
69	8 388	8 395	8 401	8 407	8 414	8 420	8 426	8 432	8 439	8 445
70	8 451	8 457	8 463	8 470	8 476	8 482	8 488	8 494	8 500	8 506
71	8 513	8 519	8 525	8 531	8 537	8 543	8 549	8 555	8 561	8 567
72	8 573	8 579	8 585	8 591	8 597	8 603	8 609	8 615	8 621	8 627
73	8 633	8 639	8 645	8 651	8 657	8 663	8 669	8 675	8 681	8 686
74	8 692	8 698	8 704	8 710	8 716	8 722	8 727	8 733	8 739	8 745
75	8 751	8 756	8 762	8 768	8 774	8 779	8 785	8 791	8 797	8 802

N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
76	8 808	8 814	8 820	8 825	8 831	8 837	8 842	8 848	8 854	8 859
77	8 865	8 871	8 876	8 882	8 887	8 893	8 899	8 904	8 910	8 915
78	8 921	8 927	8 932	8 938	8 943	8 949	8 954	8 960	8 965	8 971
79	8 976	8 982	8 987	8 993	8 998	9 004	9 009	9 015	9 020	9 025
80	9 031	9 036	9 042	9 047	9 053	9 058	9 063	9 069	9 074	9 079
81	9 085	9 090	9 096	9 101	9 106	9 112	9 117	9 122	9 128	9 133
82	9 138	9 143	9 149	9 154	9 159	9 165	9 170	9 175	9 180	9 186
83	9 191	9 196	9 201	9 206	9 212	9 217	9 222	9 227	9 232	9 238
84	9 243	9 248	9 253	9 258	9 263	9 269	9 274	9 279	9 284	9 289
85	9 294	9 299	9 304	9 309	9 315	9 320	9 325	9 330	9 335	9 340
86	9 345	9 350	9 355	9 360	9 365	9 370	9 375	9 380	9 385	9 390
87	9 395	9 400	9 405	9 410	9 415	9 420	9 425	9 430	9 435	9 440
88	9 445	9 450	9 455	9 460	9 465	9 469	9 474	9 479	9 484	9 489
89	9 494	9 499	9 504	9 509	9 513	9 518	9 523	9 528	9 533	9 533
90	9 542	9 547	9 552	9 557	9 562	9 566	9 571	9 576	8 581	9 586
91	9 590	9 595	9 600	9 605	9 609	9 614	9 619	9 624	9 628	9 633
92	9 638	9 643	9 647	9 652	9 657	9 661	9 666	9 671	9 675	9 680
93	9 685	9 689	9 694	9 699	9 703	9 708	9 713	9 717	9 722	9 727
94	9 731	9 736	9 741	9 745	9 750	9 754	9 759	9 763	9 768	9 773
95	9 777	9 782	9 786	9 791	9 795	9 800	9 805	9 809	9 814	9 818
96	9 823	9 827	9 832	9 836	9 841	9 845	9 850	9 854	9 859	9 863
97	9 868	9 872	9 877	9 881	9 886	9 890	9 894	9 899	9 903	9 908
98	9 912	9 917	9 921	9 926	9 930	9 934	9 939	9 943	9 948	9 952
99	9 956	9 961	9 965	9 969	9 974	9 978	9 983	9 987	9 991	9 999
100	0 000	0 004	0 009	0 013	0 017	0 022	0 026	0 030	0 035	0 039
101	0 043	0 048	0 052	0 056	0 060	0 065	0 069	0 073	0 077	0 082
102	0 086	0 090	0 095	0 099	0 103	0 107	0 111	0 116	0 120	0 124
103	0 128	0 133	0 137	0 141	0 145	0 149	0 154	0 158	0 162	0 166
104	0 170	0 175	0 179	0 183	0 187	0 191	0 195	0 199	0 204	0 208
105	0 212	0 216	0 220	0 224	0 228	0 233	0 237	0 241	0 245	0 249
106	0 253	0 257	0 261	0 265	0 269	0 273	0 278	0 282	0 286	0 290
107	0 294	0 298	0 302	0 306	0 310	0 314	0 318	0 322	0 326	0 330
108	0 334	0 338	0 342	0 346	0 350	0 354	0 358	0 362	0 366	0 370
109	0 374	0 378	0 382	0 386	0 390	0 394	0 398	0 402	0 406	0 410
110	0 414	0 418	0 422	0 426	0 430	0 434	0 438	9 441	0 445	0 449

ТАБЛИЦА ДЕЦИБЕЛ

дб	Отношение токов и напряжений		Отношение мощностей		дб	Отношение токов и напряжений		Отношение мощностей	
	Усиление	Ослабление	Усиление	Ослабление		Усиление	Ослабление	Усиление	Ослабление
0,1	1,01	0,989	1,02	0,977	4,2	1,62	0,617	2,63	0,380
0,2	1,02	0,977	1,05	0,955	4,4	1,66	0,603	2,75	0,363
0,3	1,03	0,966	1,07	0,933	4,6	1,70	0,589	2,88	0,347
0,4	1,05	0,955	1,10	0,912	4,8	1,74	0,575	3,02	0,331
0,5	1,06	0,944	1,12	0,891	5,0	1,78	0,562	3,16	0,316
0,6	1,07	0,933	1,15	0,871	5,5	1,88	0,531	3,55	0,282
0,7	1,08	0,923	1,17	0,851	6,0	1,99	0,501	3,98	0,251
0,8	1,10	0,912	1,20	0,832	6,5	2,11	0,473	4,47	0,224
0,9	1,11	0,902	1,23	0,813	7,0	2,24	0,447	5,01	0,199
1,0	1,12	0,891	1,26	0,794	7,5	2,37	0,422	5,62	0,178
1,1	1,13	0,881	1,29	0,776	8,0	2,51	0,398	6,31	0,158
1,2	1,15	0,871	1,32	0,759	8,5	2,66	0,376	7,08	0,141
1,3	1,16	0,861	1,35	0,741	9,0	2,82	0,355	7,94	0,126
1,4	1,17	0,851	1,38	0,724	9,5	2,98	0,335	8,91	0,112
1,5	1,19	0,841	1,41	0,708	10,0	3,16	0,316	10,00	0,100
1,6	1,20	0,832	1,44	0,692	11,0	3,55	0,282	12,6	0,079
1,7	1,22	0,822	1,48	0,676	12,0	3,98	0,251	15,8	0,063
1,8	1,23	0,813	1,51	0,661	13,0	4,47	0,224	19,9	0,050
1,9	1,24	0,803	1,55	0,646	14,0	5,01	0,199	25,1	0,040
2,0	1,26	0,794	1,58	0,631	15,0	5,62	0,178	31,6	0,032
2,2	1,29	0,776	1,66	0,603	16,0	6,31	0,158	39,8	0,025
2,4	1,32	0,759	1,74	0,575	17,0	7,08	0,141	50,1	0,020
2,6	1,35	0,741	1,82	0,550	18,0	7,94	0,126	63,1	0,016
2,8	1,38	0,724	1,90	0,525	19,0	8,91	0,112	79,4	0,013
3,0	1,41	0,708	1,99	0,501	20,0	10,00	0,100	100,0	0,010
3,2	1,44	0,692	2,09	0,479	25,0	17,7	0,056	$3{,}16 \cdot 10^2$	$3{,}16 \cdot 10^{-3}$
3,4	1,48	0,676	2,19	0,457	30,0	31,6	0,032	10^3	10^{-3}
3,6	1,51	0,661	2,29	0,436	35,0	56,0	0,018	$3{,}16 \cdot 10^3$	$3{,}16 \cdot 10^{-4}$
3,8	1,55	0,646	2,40	0,417	40,0	100,0	0,010	10^4	10^{-4}
4,0	1,58	0,631	2,51	0,398	50,0	316,0	0,003	10^5	10^{-5}

